

Prestazione energetica di edifici in condizioni estive: l'effetto dell'isolamento termico

Original

Prestazione energetica di edifici in condizioni estive: l'effetto dell'isolamento termico / Ballarini, Ilaria. - (2011).
[10.6092/polito/porto/2643834]

Availability:

This version is available at: 11583/2643834 since: 2016-06-14T15:38:06Z

Publisher:

Politecnico di Torino

Published

DOI:10.6092/polito/porto/2643834

Terms of use:

Altro tipo di accesso

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)



Politecnico di Torino
Dipartimento di Energetica

Dottorato di Ricerca in *Innovazione Tecnologica per l'Ambiente Costruito*
XXIII Ciclo

TESI DI DOTTORATO

**PRESTAZIONE ENERGETICA DI EDIFICI IN CONDIZIONI ESTIVE:
L'EFFETTO DELL'ISOLAMENTO TERMICO**

Candidata

Ilaria Ballarini

(matricola 151701)

Tutor

prof. Vincenzo Corrado

A.A. 2011

Indice

Introduzione.....	7
1. L'isolamento termico dell'involucro opaco e la prestazione termica estiva dell'edificio.....	10
1.1. Aspetti normativi.....	10
1.2. Stato dell'arte: analisi della tecnologia.....	13
1.2.1. Oltre i requisiti minimi di prestazione energetica: l'edificio passivo	13
1.2.2. Strategie passive di controllo termico degli edifici.....	14
1.2.3. Altre strategie passive finalizzate alla rimozione del calore nella stagione estiva	21
1.2.4. Tecniche di isolamento termico.....	23
1.2.5. Dall'edificio passivo allo <i>Standard Passivhaus</i>	25
1.3. Stato dell'arte: ricerca bibliografica	29
2. Una nuova modalità di analisi termica dell'edificio	32
2.1. I termini del bilancio energetico e le sollecitazioni termiche dinamiche dell'edificio..	32
2.1.1. L'impostazione metodologica.....	32
2.1.2. I contributi al bilancio termico dell'aria interna	36
2.2. Lo sviluppo della metodologia d'indagine attraverso uno strumento di simulazione numerica dettagliata.....	40
2.2.1. Il software <i>EnergyPlus</i>	40
2.2.2. Applicazione del software <i>EnergyPlus</i>	43
2.3. L'applicazione della modalità di analisi termica.....	46
2.3.1. Un esempio di applicazione.....	46
2.3.2. La rappresentazione dei termini del bilancio energetico	48
2.3.3. Possibili impieghi del metodo nella diagnosi energetica degli edifici.....	54
2.4. L'utilizzo della metodologia d'indagine per il confronto di modelli di calcolo.....	56
2.4.1. Il metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario (UNI/TS 11300)..	56
2.4.2. Modelli a confronto attraverso l'applicazione ad un caso studio	61
3. L'analisi parametrica di alcuni casi studio.....	78
3.1. I casi studio.....	79

3.1.1.	Edificio ad uso residenziale	79
3.1.2.	Edificio ad uso uffici.....	88
3.2.	I parametri oggetto dell'analisi	94
3.2.1.	L'estensione della superficie trasparente	94
3.2.2.	I parametri termici e solari della superficie trasparente	94
3.2.3.	L'assorbimento solare della superficie esterna dell'involucro opaco	97
3.2.4.	Il livello di isolamento termico dei componenti edilizi opachi	97
3.2.5.	La capacità termica della struttura edilizia.....	98
3.3.	Lo sviluppo dell'analisi parametrica.....	118
3.3.1.	Realizzazione di un campione di casi rappresentativo.....	118
3.3.2.	Prime considerazioni sul campione analizzato.....	121
3.3.3.	Individuazione di parametri "semi-empirici"	123
3.3.4.	Analisi di sensibilità.....	129
3.3.5.	Effetti dell'isolamento termico sulla prestazione termica estiva.....	141
4.	Estensione dello studio ad un edificio passivo	149
4.1.	La casa passiva di Carpi.....	149
4.1.1.	Descrizione dell'edificio	149
4.1.2.	Analisi della prestazione energetica estiva	152
4.1.3.	Differenti assunzioni nei dati d'ingresso.....	155
4.2.	Una proposta di ottimizzazione della prestazione energetica della casa passiva.....	160
5.	Conclusioni e sviluppi futuri	166
	Bibliografia	170
	Nomenclatura	179
	Ringraziamenti	181

Introduzione

La Direttiva Europea 2002/91/CE (EPBD), recentemente aggiornata dalla Direttiva Europea 2010/31/UE (EPBD *recast*), denuncia la rapida crescita dei sistemi di condizionamento estivo dell'aria che creano considerevoli problemi nella domanda di energia elettrica nei periodi di picco; a tal proposito, è data la priorità alle strategie che migliorino le prestazioni termiche degli edifici durante il periodo estivo. In risposta a questa esigenza, la recente legislazione italiana, accanto ai requisiti di prestazione energetica in regime di riscaldamento, pone l'attenzione anche verso il comportamento estivo dell'edificio e, in particolare, dell'involucro edilizio. Per quanto riguarda in particolare l'involucro opaco, mentre l'adozione di adeguati spessori di isolante termico permette il soddisfacimento dei requisiti termici invernali, resta da approfondire quale sia l'effetto dell'isolamento termico nella progettazione termica estiva dell'edificio.

Il presente lavoro rappresenta lo sviluppo di una ricerca volta ad approfondire il tema dell'ottimizzazione del livello di isolamento termico nella progettazione estiva dell'edificio, in riferimento a differenti scenari d'uso e tipologie edilizie. Lo studio individua una metodologia di indagine dei parametri che maggiormente influenzano la prestazione in regime di raffrescamento degli edifici; tale metodologia permette di analizzare per successivi livelli di dettaglio, in una prima fase, l'effetto dell'intero involucro edilizio sul comportamento termico estivo dell'edificio e, in una seconda fase, l'effetto del solo involucro opaco e in particolare del livello di isolamento termico. Il metodo consiste nell'analizzare i differenti contributi al bilancio termico convettivo dell'aria interna e le loro interrelazioni in riferimento a differenti condizioni al contorno; ciascun contributo è scorporato in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche dell'ambiente esterno ed interno. L'elaborazione della metodologia di indagine è sviluppata applicando un codice di simulazione numerica dettagliata (*EnergyPlus*) e individuando successivamente una specifica modalità di rappresentazione dei risultati.

La nuova modalità di analisi termica degli edifici può essere impiegata in molteplici applicazioni, prime fra tutte la progettazione termo-fisica degli edifici e la diagnosi energetica. Il metodo, infatti, permette l'individuazione di "criticità" e l'applicazione di strategie per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici. Il metodo consente inoltre di confrontare diversi modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici. La principale applicazione della metodologia d'indagine, tuttavia, è rivolta all'effettuazione di un'analisi parametrica su casi studio: l'analisi permette di comprendere in quali condizioni al contorno aumenti l'importanza del progetto dell'involucro e, più nello specifico, della parte opaca dell'involucro e del suo isolamento termico.

In Figura 1 è illustrato uno schema della procedura di ricerca ed è rappresentato lo sviluppo del metodo con le sue possibili applicazioni; lo schema riassume in sé le fasi di ricerca e gli aspetti trattati nei diversi capitoli della tesi.

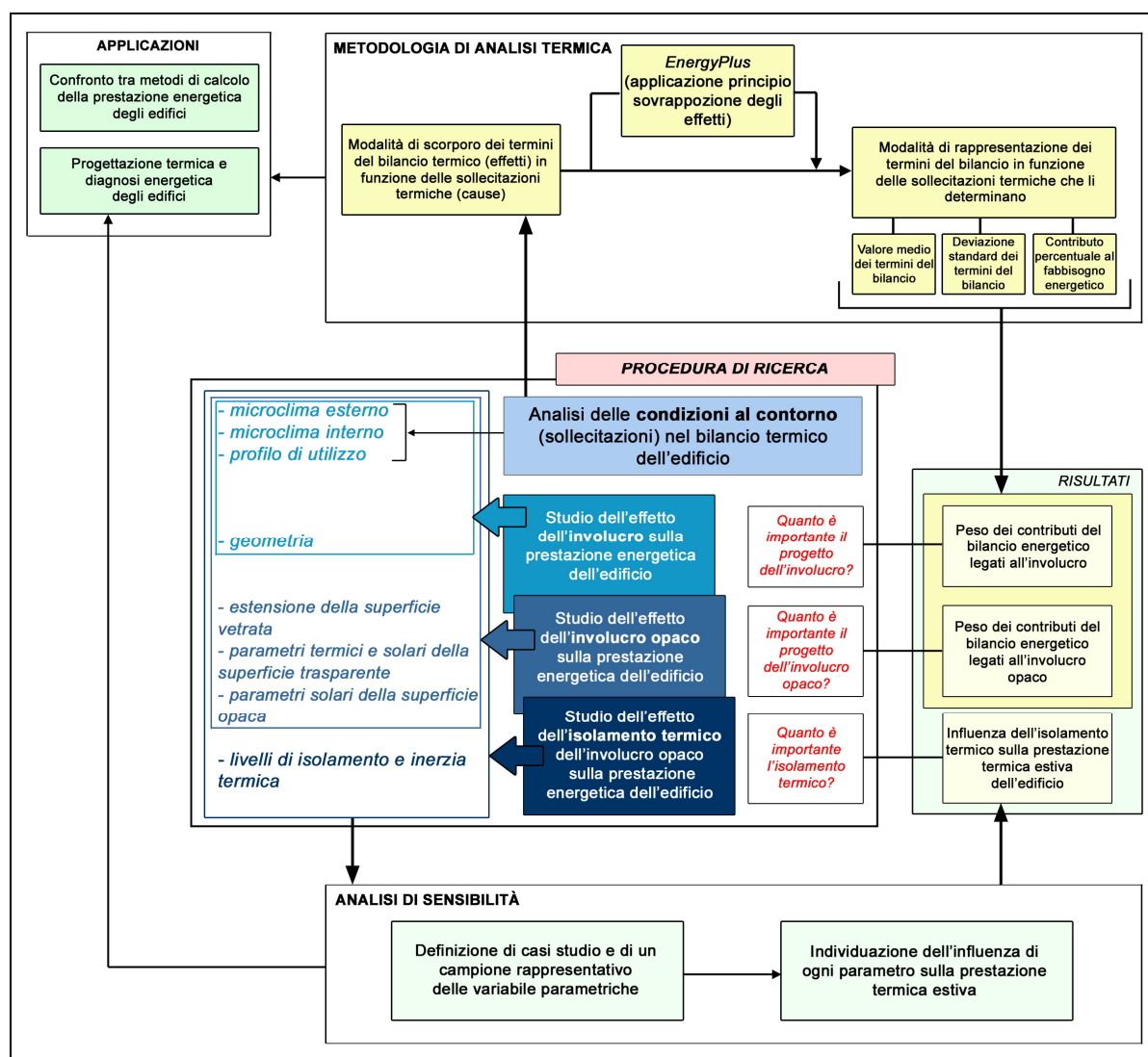


Figura 1 Flowchart della procedura di ricerca e dello sviluppo della metodologia di analisi termica con l'indicazione degli obiettivi e delle possibili applicazioni.

La trattazione si sviluppa in quattro capitoli. Nel primo capitolo sono evidenziati gli aspetti normativi, la tecnologia e lo stato dell'arte in merito agli studi sull'isolamento termico con particolare riferimento alla prestazione termica estiva degli edifici. Emerge in particolar modo l'esigenza di una progettazione integrata, in cui i componenti del sistema edificio-impianto, che interagiscono tra loro e con il contesto esterno, devono essere progettati e installati seguendo strategie di controllo termico passivo finalizzate alla riduzione dei consumi energetici. Sono analizzati sia le recenti legislazione energetica, sia gli standard legati alla progettazione di edifici passivi: vengono sintetizzati i principi dello *Standard Passivhaus*, sia nella sua forma originaria sia nel suo concetto esteso alla progettazione nel Sud Europa (progetto "Passive-on"). Gli studi sull'isolamento termico sono tuttavia piuttosto settoriali; emerge la necessit  di ampliare l'indagine per contemplare tutti gli aspetti che influenzano il fabbisogno energetico per il raffrescamento, al fine di indagare l'effetto dell'isolamento termico nella progettazione termica estiva di edifici caratterizzati

da usi e tipologie costruttive differenti.

Nel secondo capitolo è illustrata la nuova modalità di analisi termica degli edifici e sono mostrate le possibili applicazioni della metodologia: un caso studio è proposto quale esempio per descrivere la modalità di rappresentazione dei risultati e per illustrare una delle possibili applicazioni del metodo, ovvero l'individuazione di criticità e la messa in atto di strategie per ottimizzare il progetto energetico. Un'altra applicazione della metodologia riguarda il confronto tra modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici: è proposto il confronto tra il metodo di calcolo dettagliato in regime dinamico (*EnergyPlus*) con un metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario (UNI EN ISO 13790); la metodologia può rivelarsi un ottimo strumento per la validazione del modello quasi-stazionario.

Il terzo capitolo è dedicato all'analisi parametrica, quale applicazione principale del metodo. Si considerano due casi studio, un edificio residenziale e un edificio ad uso uffici. Sono indagati i principali parametri che influenzano la prestazione energetica degli edifici attraverso l'effettuazione di un'analisi di sensibilità su un campione rappresentativo di casi, caratterizzati da una diversa combinazione delle variabili parametriche (60 varianti per ciascun caso studio); alcune di queste sono fissate in funzione della località, della destinazione d'uso e della geometria dell'edificio. L'applicazione della metodologia d'indagine permette di individuare il peso dei contributi del bilancio energetico legati all'involucro nel suo complesso e il peso dei contributi del bilancio energetico legati all'involucro opaco. L'analisi di sensibilità permette anche di comprendere se e in quali condizioni assume rilevanza il livello di isolamento termico nella quantificazione della prestazione termica estiva.

Nel quarto capitolo la metodologia di analisi termica è applicata ad un edificio caratterizzato dall'iper-isolamento delle strutture d'involucro, una casa passiva in costruzione a Carpi (MO). L'analisi energetica viene effettuata anche ipotizzando un profilo d'utilizzo differente dell'edificio e un diverso contesto climatico. Al fine di ottimizzare il progetto e migliorare il comportamento termico estivo dell'edificio sono proposte alcune strategie d'intervento, prima fra tutte l'attivazione della ventilazione naturale in modalità *free cooling*.

1. L'isolamento termico dell'involucro opaco e la prestazione termica estiva dell'edificio

1.1. Aspetti normativi

La Direttiva Europea *Energy Performance of Buildings* (EPBD) 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia – recentemente modificata dalla Direttiva Europea 2010/31/UE del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD *recast*) – pone l'accento sull'odierna proliferazione degli impianti di condizionamento dell'aria nei paesi europei, con i conseguenti gravi problemi di carico massimo che comportano un aumento del costo dell'energia elettrica ed uno squilibrio del bilancio energetico. Per questo motivo, all'interno della direttiva si richiede di dare priorità alle strategie che contribuiscono a migliorare la prestazione termica degli edifici durante il periodo estivo e concentrarsi sulle misure che evitano il surriscaldamento (ad es. ombreggiamento, capacità termica dell'edificio, etc.), nonché sullo sviluppo e applicazione di tecniche di raffrescamento passivo, soprattutto quelle che contribuiscono a migliorare le condizioni climatiche interne e il microclima intorno agli edifici.

L'Italia ha recepito le disposizioni comunitarie della direttiva 2002/91/CE attraverso il D. Lgs. n. 192 del 19 agosto 2005, successivamente integrato e modificato dal D. Lgs. n. 311 del 29 dicembre 2006: le disposizioni legislative nazionali contengono, tra l'altro, i principi generali e le norme transitorie in tema di requisiti minimi prestazionali, rivolti sia agli edifici di nuova costruzione sia agli edifici esistenti soggetti a ristrutturazione, secondo livelli di applicazione differenti stabiliti dal decreto stesso. In riferimento alla prestazione termica dell'edificio, i decreti fissano, tra i requisiti più importanti, i valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EP_i) – inteso come fabbisogno annuale di energia primaria per il riscaldamento riferito all'unità di superficie utile o di volume lordo climatizzato a seconda della destinazione d'uso dell'edificio (cfr. Tabella 1.1 e Tabella 1.2) – e i valori limite di trasmittanza termica dei componenti opachi e trasparenti dell'involucro edilizio (cfr. Tabella 1.3). I decreti legislativi si indirizzano maggiormente verso l'ottimizzazione della prestazione energetica invernale dell'edificio, mentre l'attenzione verso la prestazione termica estiva viene meno, limitandosi alla specificazione di alcuni accorgimenti progettuali, quali, ad esempio, l'adeguamento dei componenti della struttura edilizia ad un valore minimo di massa frontale, l'utilizzo di ventilazione naturale, l'introduzione di efficaci sistemi schermanti delle superfici vetrate.

Le lacune legislative in materia di prestazione energetica estiva degli edifici sono parzialmente colmate dal Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 n. 59, recante l'attuazione di parte dei decreti legislativi precedentemente citati. Nel documento legislativo è fissato un indice di prestazione energetica estiva che esprime il fabbisogno di energia netta di raffrescamento dell'edificio ($EP_{e,inv}$), relativo alla superficie o al volume raffrescato a seconda della destinazione

d'uso dell'edificio. In particolare, per le abitazioni il valore limite dell' $EP_{e,inv}$ è fissato a 40 kWh/(m² anno) per le zone climatiche A e B, a 30 kWh/(m² anno) per le zone climatiche C, D, E e F; mentre per tutte le altre destinazioni d'uso, il valore è pari a 14 kWh/(m³ anno) per le zone climatiche A e B, a 10 kWh/(m³ anno) per le zone climatiche C, D, E e F.

Inoltre, ma solo per alcune località, al requisito di massa frontale imposto dal D. Lgs. n. 311/2006 si aggiunge un valore massimo prefissato del modulo della trasmittanza termica periodica, per le pareti verticali opache in riferimento a determinate esposizioni (da verificarsi in alternativa alla massa frontale) e per i componenti edilizi opachi orizzontali ed inclinati (cfr. Tabella 1.4). L'alternativa al rispetto dei suddetti parametri di inerzia termica è costituita dall'utilizzo di tecniche o materiali innovativi (es. utilizzo di copertura a verde), la cui scelta, secondo il D.P.R. n. 59/2009, deve essere supportata da adeguata documentazione e certificazione circa la tecnologia e i materiali che ne attestino l'equivalenza con le disposizioni legislative.

Tabella 1.1. Valori limite dell' EP_1 per abitazioni in kWh/(m² anno), applicabili dal 1° gennaio 2010 (fonte: D. Lgs. n. 311/2006, allegato C).

S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	da 601 GG	a 900 GG	da 901 GG	a 1400 GG	da 1401 GG	a 2100 GG	da 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000 GG
≤ 0,2	8,5	8,5	12,8	12,8	21,3	21,3	34	34	46,8	46,8
≥ 0,9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116

Tabella 1.2. Valori limite dell' EP_1 per tutte le altre destinazioni d'uso in kWh/(m³ anno), applicabili dal 1° gennaio 2010 (fonte: D. Lgs. n. 311/2006, allegato C).

S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	da 601 GG	a 900 GG	da 901 GG	a 1400 GG	da 1401 GG	a 2100 GG	da 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000 GG
≤ 0,2	2,0	2,0	3,6	3,6	6	6	9,6	9,6	12,7	12,7
≥ 0,9	8,2	8,2	12,8	12,8	17,3	17,3	22,5	22,5	31	31

Alla luce della recente legislazione energetica edilizia, per garantire il soddisfacimento dei requisiti minimi di prestazione energetica occorre applicare all'edificio tecnologie costruttive e/o impiantistiche idonee al raggiungimento degli obiettivi prefissati. In particolare, per quanto riguarda l'involucro opaco, l'utilizzo del materiale isolante termico contribuisce al rispetto dei requisiti imposti dalla legislazione nazionale, sia in termini di trasmittanza termica degli elementi d'involucro sia in termini di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento dell'edificio (prestazione termica invernale).

Tabella 1.3. Valori limite della trasmittanza termica U [$W/(m^2 K)$] delle strutture opache, dei componenti trasparenti e dei vetri (fonte: D. Lgs. n. 311/2006, allegato C).

Zona climatica	dal 1° gennaio 2010				dal 1° gennaio 2011
	Strutture opache verticali	Coperture	Pavimenti verso locali non riscaldati o esterno	Chiusure trasparenti	Vetri
A	0,62	0,38	0,65	4,6	3,7
B	0,48	0,38	0,49	3,0	2,7
C	0,40	0,38	0,42	2,6	2,1
D	0,36	0,32	0,36	2,4	1,9
E	0,34	0,30	0,33	2,2	1,7
F	0,33	0,29	0,32	2,0	1,3

Tabella 1.4. Valori limite della massa frontale e/o della trasmittanza termica periodica delle strutture opache (fonte: D.P.R. n. 59/2009).

Categorie di edifici	Zone climatiche	Elementi d'involucro	Requisiti
E.1, E.2, E.3, E.4	A, B, C, D, E con irradianza solare media mensile sul piano orizzontale $\geq 290 W/m^2$	PARETI VERTICALI OPACHE (eccetto quadranti nord-ovest, nord, nord-est)	$m_s > 230 kg/m^2$ oppure $Y_{ie} < 0,12 W/(m^2 K)$
		PARETI OPACHE ORIZZONTALI O INCLINATE	$Y_{ie} < 0,20 W/(m^2 K)$

Inoltre, al di là dei requisiti minimi imposti legalmente, qualora la progettazione edilizia richieda il raggiungimento di standard associati ad una costruzione di tipo passivo (*Standard Passivhaus*, cfr. par. 1.2), l'utilizzo del materiale isolante diventa indispensabile e il suo livello assume valori rilevanti, anche in combinazione con tecnologie innovative.

Ai fini della caratterizzazione della prestazione termica estiva dell'edificio, è l'inerzia termica e non l'isolamento termico dell'involucro opaco ad essere determinante; tuttavia, considerando un uso dell'edificio lungo tutto l'arco dell'anno, il materiale isolante influenza anche la prestazione termica estiva, riducendo la quantità di calore scambiata per trasmissione attraverso l'involucro opaco. Perciò, stabilita la necessità di utilizzare il materiale isolante per garantire il miglioramento della prestazione termica invernale, si rivela necessaria anche l'ottimizzazione del livello di isolamento termico nella progettazione estiva dell'edificio, in riferimento a diversi scenari d'uso e di tipologia edilizia.

1.2. Stato dell'arte: analisi della tecnologia

1.2.1. Oltre i requisiti minimi di prestazione energetica: l'edificio passivo

L'utilizzo del materiale isolante nell'involucro edilizio è da sempre la tecnica più diffusa per garantire il soddisfacimento dei requisiti di prestazione energetica, già a partire dalla metà degli anni Settanta con l'applicazione delle prime disposizioni legislative in materia di contenimento dei consumi energetici in edilizia. Attualmente la tecnologia tradizionale si affianca a sistemi più innovativi per garantire una progettazione sempre più attenta al comportamento energetico dell'edificio; i componenti edilizi non sono considerati a se stanti, ma sono parte integrante di un sistema edificio-impianto in cui i componenti interagiscono tra loro per la messa in atto di strategie finalizzate al conseguimento di un'elevata prestazione energetica.

La realtà edilizia, in senso più generale, può essere classificata nelle seguenti macro-aree in funzione del livello di prestazione energetica:

- edifici convenzionali che non risultano adeguati alle normative sul risparmio energetico;
- edifici convenzionali che corrispondono a tali normative;
- edifici a basso consumo energetico;
- edifici passivi;
- edifici a consumo energetico zero.

Attualmente gli ultimi tre livelli sono quelli che meritano un'attenzione maggiore perché costituiscono l'obiettivo verso cui dovrà tendere tutta la futura progettazione edilizia. In particolare, un elemento significativo è il concetto di "edificio passivo". Sebbene nell'Europa Centrale l'espressione "Casa Passiva" sia fortemente associata ad uno standard di progettazione, denominato "*Standard Passivhaus*", nei paesi dell'Europa Meridionale il termine "Casa Passiva" continua ad indicare un'abitazione costruita secondo alcuni principi generali della *progettazione passiva*.

L'espressione *progettazione passiva* viene solitamente utilizzata per indicare una progettazione che abbina l'utilizzo di sistemi passivi – ovvero sistemi che forniscono un determinato servizio utilizzando solo i flussi di energia rinnovabile senza impiegare macchinari ausiliari – con alcuni componenti attivi, quali ad esempio i ventilatori e le pompe. Il principio alla base della *progettazione passiva* è quello di controllare e modulare l'ingresso della luce diurna, il passaggio di calore ed il flusso di aria all'interno dell'edificio; le tecniche di *progettazione passiva* prevedono per esempio un corretto orientamento dell'edificio, un utilizzo appropriato di finestre e di elementi ombreggianti, un utilizzo appropriato di isolamento e massa termica. L'utilizzo dei componenti attivi permette di sfruttare meglio e ottimizzare i flussi energetici naturali; l'input di energia impiegata (tipicamente energia elettrica) dai componenti attivi risulta comunque molto minore dell'output di energia termica

fornito dal sistema passivo. Alla base del concetto di “edificio passivo” vi è perciò l’obiettivo del raggiungimento di determinati livelli di benessere termo-igrometrico e di qualità dell’aria dell’ambiente interno attuabile attraverso l’ottimizzazione del progetto dell’involucro edilizio e dei sistemi impiantistici che per la generazione e il trasporto dell’energia termica non richiedono l’utilizzo di fonti energetiche convenzionali o ne richiedono un’esigua quantità.

La necessità di controllo termico di un ambiente può essere definita come la deviazione delle condizioni esterne (determinate dal clima) rispetto alle condizioni richieste internamente all’edificio per il benessere degli occupanti e per la conservazione degli oggetti. La domanda di energia utile dell’edificio per ottenere il controllo desiderato dipende dalle caratteristiche geometriche, termiche e ottiche dell’involucro edilizio e dagli apporti termici interni. I parametri climatici che influenzano il fabbisogno energetico dell’edificio sono, tra gli altri, la temperatura dell’aria esterna, l’irradiazione solare, la velocità del vento e la possibilità di sfruttare i pozzi e le sorgenti esterne per attingere o esportare energia. Adottare l’indirizzo progettuale passivo significa calare ogni progetto edilizio nel suo specifico contesto microclimatico. Il controllo termico attuato con una combinazione di strategie adattata al clima, al tipo di edificio, alla sua destinazione d’uso (e dunque agli apporti termici interni) viene definito “controllo termico passivo”. Si riportano di seguito le principali strategie passive di controllo termico degli edifici; tra esse è contemplato anche l’isolamento termico, la cui prestazione sul fabbisogno energetico dell’edificio va considerata in relazione a tutte le altre strategie, in vista della realizzazione di un sistema edificio-impianto di tipo integrato.

1.2.2. Strategie passive di controllo termico degli edifici

In Tabella 1.5 si riporta un elenco delle strategie passive di controllo termico degli edifici, con l’indicazione per ciascuna strategia del sussistere o meno di una relazione con i diversi termini del bilancio di energia dell’edificio (trasmissione termica, ventilazione, apporti solari, apporti interni).

Tabella 1.5 Strategie passive di controllo termico degli edifici e indicazione dei termini del bilancio di energia dell’edificio sui quali ciascuna strategia determina un effetto di importanza maggiore (“X”) o minore (“x”).

Strategia passiva di controllo termico	Termini del bilancio di energia dell’edificio			
	Trasmissione termica	Ventilazione	Apporti solari	Apporti interni
Forma e tipologia generale	X	x	X	
Orientamento	x	x	X	
Schermatura solare da strutture proprie dell’edificio e da ostacoli circostanti			X	
Prestazione termica e solare dei serramenti	X		X	
Colore delle superfici opache esterne			X	
Isolamento termico dell’involucro opaco	X		X	
Ponti termici	X			
Inerzia termica	X		X	
Ventilazione e qualità dell’aria interna		X		
NOTA: Nessuna strategia passiva incide sugli apporti interni, essendo questi determinati dall’uso dell’edificio.				

Di seguito si analizzano nel dettaglio le strategie passive di controllo termico degli edifici.

Forma e tipologia generale

La forma o la tipologia generale degli edifici viene definita da tutti i componenti dell'involucro edilizio che separano gli spazi climatizzati dall'ambiente esterno o dagli spazi non climatizzati; al crescere della superficie esposta crescono le dispersioni di energia verso l'esterno nella stagione invernale e i guadagni termici in estate, mentre al crescere del volume climatizzato crescono la massa e l'energia che essa può accumulare, contribuendo a smorzare le oscillazioni termiche. Un parametro che descrive importanti caratteristiche termiche dell'edificio è il rapporto superficie disperdente/volume climatizzato o "rapporto S/V" o "rapporto di forma".

Dal punto di vista energetico sono preferibili valori limitati di tale rapporto, ottenibili mediante l'impiego di forme regolari e compatte, dimensioni elevate ed estese superfici comuni con altri edifici climatizzati. Considerando un'abitazione, una forma compatta è funzionale in inverno alla riduzione delle dispersioni termiche; parimenti, nella stagione estiva potrebbe essere vantaggioso progettare l'edificio con una compattezza di tipo medio-alta per conseguire un più ridotto fabbisogno energetico per il raffrescamento. Tuttavia una compattezza elevata potrebbe essere talvolta sacrificata per avere una più ampia superficie esposta a sud, al fine di sfruttare gli apporti solari nella stagione invernale; in questa situazione, si potrebbe adottare una soluzione intermedia utilizzando una compattezza media.

Orientamento

Un edificio con un orientamento corretto dovrebbe presentare un'estesa superficie disperdente esposta a sud (asse maggiore dell'edificio in direzione est-ovest); questo contribuirebbe ad incrementare gli apporti solari nella stagione invernale in presenza di un involucro caratterizzato da una estesa superficie vetrata. In estate, tuttavia, occorre prevedere una schermatura efficace: il sistema da preferirsi a sud è l'aggetto orizzontale, che riesce ad impedire alla radiazione solare diretta di incidere sulla superficie vetrata quando, in estate, il sole è alto, mentre la lascia penetrare in inverno, quando il sole è più basso sull'orizzonte.

La facciata a nord avrà di preferenza una superficie vetrata ridotta, dal momento che le finestre costituiscono l'elemento "debole" dell'involucro isolato: tipicamente la percentuale di superficie vetrata in riferimento alla superficie di pavimento dovrebbe essere attorno al 20% per l'esposizione sud e al 5% per l'esposizione nord.

Le superfici vetrate ad est e ad ovest richiederanno particolare cura nella schermatura in estate poiché investite dal sole basso sull'orizzonte; per questo motivo sono da preferirsi schermi o oggetti verticali.

Schermatura solare da strutture proprie dell'edificio e da ostacoli circostanti

Si possono individuare generalmente tre tipi di forme di ombreggiamento:

- ombreggiatura propria dovuta alla proiezione dell'ombra di alcuni elementi dell'edificio su altre porzioni dell'involucro;
- ombreggiatura generata da ostacoli vicini come schermi fissi (aggetti orizzontali o verticali) o schermi mobili (veneziane, tende, etc.);
- ombreggiatura generata da ostruzioni dell'ambiente circostante all'edificio, quali possono essere costruzioni, vegetazione alta, oppure rilievi orografici.

In linea di principio, anche in riferimento a quanto illustrato nel precedente punto (“orientamento”), si deve progettare l'edificio in modo da dotarlo di un controllo selettivo della radiazione solare incidente consentendo di colpire direttamente l'involucro edilizio in inverno e, al contrario, bloccandola in estate. I dispositivi schermanti fissi o mobili devono essere predisposti e dimensionati in modo da garantire un controllo dinamico dell'esposizione diretta al sole di alcune parti dell'involucro edilizio; in particolare, durante il periodo estivo è fondamentale controllare in modo efficace le superfici trasparenti, siano esse orizzontali, inclinate oppure verticali, al fine di evitare il surriscaldamento degli ambienti interni e l'insorgenza di condizioni di discomfort locale (asimmetrie radiative dovute a temperature superficiali interne degli elementi trasparenti molto elevate).

Prestazione termica e solare dei serramenti

I parametri principali per caratterizzare e scegliere superfici trasparenti adatte al clima, all'orientamento e allo specifico edificio, sono:

- la trasmittanza termica U (valori bassi della trasmittanza implicano una riduzione del flusso termico trasmesso per differenza di temperatura);
- il fattore solare, o trasmittanza di energia solare totale, g , che è definito come la frazione di energia solare incidente trasmessa all'interno dell'edificio (direttamente e indirettamente, a seguito dell'assorbimento) attraverso la superficie vetrata (valori bassi implicano bassi guadagni solari);
- il coefficiente di trasmissione luminosa, definito come la frazione visibile del flusso solare incidente trasmesso all'interno dell'edificio (valori elevati migliorano la disponibilità di luce naturale negli interni).

Migliorare l'isolamento termico delle finestre ha un effetto positivo nella stagione invernale, ma generalmente non è significativo in estate. In climi dominati dal riscaldamento è preferibile ridurre la trasmittanza termica dei serramenti, ma in climi moderati occorre individuare un buon compromesso

tra la trasmittanza termica e il fattore solare del vetro; infatti, diminuendo la trasmittanza le dispersioni termiche diminuiscono, ma una superficie trasparente più “isolata” è anche una superficie con ridotto fattore solare, il che determina una diminuzione degli apporti solari, utili per ridurre il fabbisogno di energia per il riscaldamento.

Il miglioramento dell'isolamento termico dei serramenti viene conseguito attraverso una combinazione dei seguenti fattori:

- incremento del numero delle lastre di vetro;
- differenti tipologie di rivestimenti basso-emissivi;
- creazioni di intercapedini tra le lastre caratterizzate dal vuoto o da gas a bassa conducibilità;
- utilizzo di materiali anche innovativi (es. aerogel).

Si può prevedere inoltre l'utilizzo di differenti tipologie di serramenti per le varie esposizioni.

La scelta della tipologia di vetro deve essere effettuata considerando la capacità della superficie di controllare la radiazione solare entrante, senza però penalizzare l'ingresso della luce in ambiente. Si possono quindi utilizzare, a questo scopo, vetri “selettivi”, che riflettono la maggior parte dell'infrarosso (cioè la parte termica della radiazione solare), ma sono molto trasparenti alla luce (cioè la parte visibile dello spettro solare). Il grado di selettività si descrive con il rapporto tra trasmittanza visibile e fattore solare.

Colore delle superfici opache esterne

Il colore delle superfici esterne influenza la quantità di radiazione solare che viene assorbita dalle superfici. Si dovrebbe perciò prevedere l'utilizzo di colori differenti per ciascuna facciata, esposizione, copertura. La strategia è utile solo per ridurre la domanda energetica per il raffrescamento; infatti l'utilizzo di colori chiari per le superfici sulle quali incide l'intensità maggiore della radiazione solare in estate rende possibile la diminuzione della richiesta di energia frigorifera. La tecnica dovrebbe essere presa in considerazione negli edifici aventi un'elevata estensione delle superfici orientate ad est e ad ovest, e per la copertura negli edifici a uno o due piani.

Occorre considerare che questa attenzione ha un effetto negativo nella stagione invernale: un colore chiaro riduce gli apporti solari in ambiente e determina l'aumento della domanda energetica per il riscaldamento. Tuttavia, qualora per ragioni estetiche il colore di tutte le superfici esterne debba essere lo stesso e siano tutte trattate con un colore chiaro, le esposizioni sud-est, sud e sud-ovest saranno le peggiori durante il periodo invernale. In questo caso l'utilità della misura deve essere valutata su base annuale e dovrebbe essere applicata nei climi dominati dalla stagione estiva.

Isolamento termico dell'involucro opaco

L'indicatore comunemente utilizzato per caratterizzare il comportamento termico di un edificio è la trasmittanza termica delle sue superfici disperdenti. L'adozione di materiali isolanti in grado di ridurre la trasmittanza degli elementi costruttivi è una delle strategie passive fondamentali per ridurre i consumi di riscaldamento. All'aumentare del livello di isolamento diminuiscono le dispersioni termiche e migliora la prestazione energetica dell'edificio. L'effetto dell'isolamento termico sul comportamento estivo dell'edificio va tuttavia valutato attentamente. Infatti, in condizioni di temperatura esterna superiore alla temperatura interna l'isolamento termico riduce il flusso termico entrante, ma parallelamente all'aumento della temperatura interna, per effetto degli apporti interni o degli apporti solari entranti attraverso i componenti trasparenti dell'involucro edilizio, l'isolamento ostacola la dispersione del calore dall'interno verso l'esterno.

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, durante il periodo di riscaldamento le dispersioni termiche attraverso gli elementi adiacenti al suolo (basamenti) sono sempre inferiori a quelle che contraddistinguono le pareti e le coperture, anche se caratterizzati da resistenze termiche paragonabili; il loro isolamento può quindi essere a volte ridotto. La temperatura del terreno, oltre ad essere più elevata nella stagione invernale e più bassa nella stagione estiva rispetto alla temperatura dell'aria esterna, oscilla in modo limitato per effetto della sua elevata inerzia termica; questa sua proprietà lo rende una risorsa termica naturale (sorgente o pozzo, in funzione della stagione) variamente sfruttabile. Nelle aree più calde del Sud Europa un elevato isolamento del basamento può comportare riduzioni sui livelli di comfort interno per la limitata capacità di scaricare calore verso un pozzo a bassa temperatura. Al crescere del numero di piani fuori terra, l'influenza del basamento risulta sempre più limitata, e quindi le scelte circa il suo isolamento sempre meno determinanti al fine del contenimento del fabbisogno globale dell'edificio.

In inverno, un buon isolamento delle pareti perimetrali limita le perdite di calore e, aumentando la temperatura delle superfici interne, riduce un'importante causa di discomfort locale, l'asimmetria radiante dovuta a pareti fredde e i danni che possono essere provocati dalla condensazione di vapore acqueo. L'isolamento delle pareti perimetrali in estate riduce i flussi di calore verso l'interno, in particolare quelli generati dalla radiazione solare incidente sulla superficie esterna; l'isolamento riduce anche i flussi di calore legati alla trasmissione termica per differenza di temperatura e va valutato attentamente, in quanto i flussi termici possono assumere nella stagione estiva sia un valore con segno positivo sia un valore con segno negativo.

Come nel caso delle pareti, ma in modo quantitativamente più significativo, l'isolamento della copertura di un edificio riduce sia le trasmissioni termiche invernali verso l'esterno che quelle estive verso l'interno (in questo caso in condizioni medie di temperatura esterna superiore alla temperatura interna). In estate le chiusure superiori, più che gli altri componenti edilizi, sono esposti alla radiazione solare diretta, e, se non opportunamente isolati, contribuiscono in maniera significativa

all'aumento delle temperature all'interno degli ambienti confinati. In caso di tetti inclinati supportati da travi di legno è preferibile ridurre i ponti termici posizionando il materiale isolante tra la struttura portante e le tegole. In caso di coperture di calcestruzzo armato è preferibile aumentare la massa termica efficace isolando esternamente. In entrambi i casi è indispensabile proteggere il materiale coibente con membrane impermeabili ed è possibile introdurre uno strato di ventilazione sotto le tegole o i coppi capace di asportare in estate l'energia termica immagazzinata.

Ponti termici

Per rendere efficace un buon isolamento termico è necessario prestare attenzione alla riduzione dell'effetto dei ponti termici. I ponti termici, oltre a causare discomfort termico, determinano, per effetto delle basse temperature superficiali, il rischio della formazione di condensa superficiale e di muffe. Occorre seguire alcune semplici regole:

- non interrompere lo strato isolante;
- in corrispondenza dei giunti degli elementi edilizi lo strato isolante non deve essere interrotto o ridotto nello spessore;
- se non è possibile non interrompere lo strato isolante, occorre utilizzare un materiale con il più alto valore di resistenza termica.

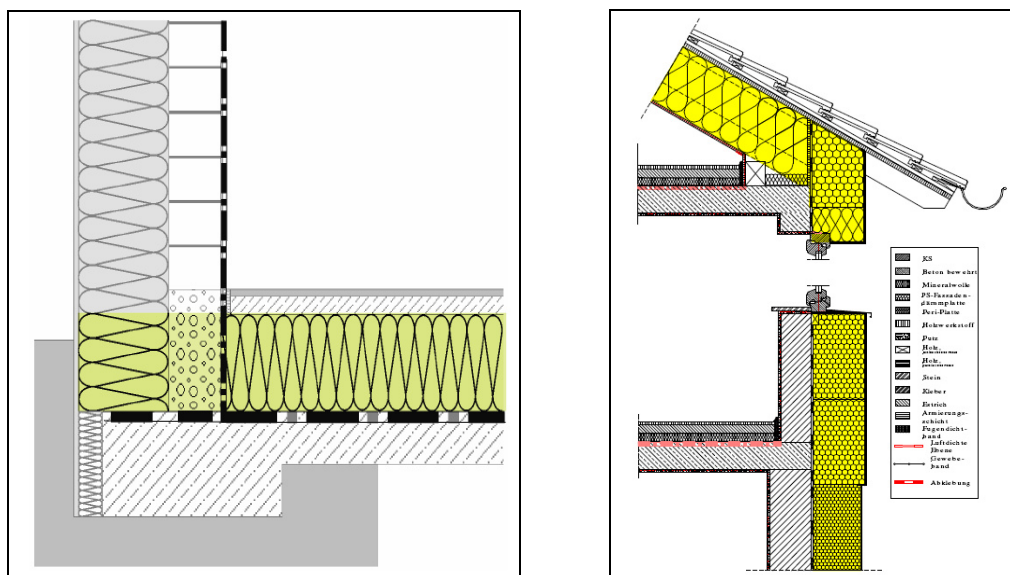


Figura 1.1 Esempio di “nodi” costruttivi in cui i ponti termici sono stati corretti. A sinistra: esempio di isolamento del solaio di pavimento; a destra: isolamento della copertura e della parete perimetrale (fonte: Ford *et al.*, *The Passivhaus Standard in European warm climates. Part 3*, 2007).

L'installazione delle finestre richiede una cura particolare: gli effetti dei ponti termici possono essere ridotti al minimo installando la finestra nel piano del rivestimento isolante, anziché in quello della parete portante e coprendo parte del telaio con altro materiale coibente. Tuttavia, a causa della

variazione di spessore del rivestimento isolante, vi è di norma un ponte termico residuo in corrispondenza della giunzione della finestra con la parete.

In Figura 1.1 sono illustrati due esempi di “nodi” costruttivi in cui i ponti termici sono stati corretti.

Inerzia termica

La presenza di strutture con elevata capacità termica contribuisce, insieme all'isolamento termico, a smorzare le oscillazioni di temperatura esterna che avvengono nell'arco della giornata, in modo che siano trasmesse all'ambiente interno attenuate e ritardate. La massa posta in contatto termico con l'aria interna può avere importanti effetti positivi sia in estate sia in inverno.

In estate la massa può essere utilizzata per limitare la temperatura massima diurna dell'aria interna, in quanto assorbirà energia termica dall'aria con relativamente piccoli aumenti di temperatura. Questo effetto può essere migliorato esponendo la struttura ad alta capacità termica ad un flusso d'aria fresca proveniente dall'esterno, durante la notte. L'energia termica accumulata dalla massa durante il giorno viene in parte asportata e la massa termica risulta pre-raffreddata per il giorno successivo. Negli edifici, residenziali, tuttavia, ciò può a volte risultare difficile a causa di limitazioni di utilizzo dello spazio. Ciononostante, è possibile applicare la ventilazione notturna con l'impiego di dispositivi di apertura automatica di bocchette o finestre, aperture protette a livelli elevati e una progettazione che favorisca il movimento dell'aria. Con questo processo è possibile mantenere le temperature interne sensibilmente al di sotto delle temperature ambientali esterne durante il periodo estivo. L'effetto del raffrescamento offerto dalla massa termica associata alla ventilazione notturna funziona al meglio nei luoghi in cui vi è un'apprezzabile escursione giorno-notte della temperatura dell'aria esterna.

In maniera analoga, in inverno la massa può assorbire il flusso termico relativo agli apporti interni prodotti durante il giorno e rilasciarlo di notte nell'ambiente.

Ventilazione e qualità dell'aria interna

La ventilazione è necessaria in un edificio per mantenere costante il livello della qualità dell'aria interna. Le esigenze per la ventilazione variano a seconda del tipo di edificio e del numero di occupanti. Nelle abitazioni è necessario assicurare un ricambio d'aria tale che sia in grado di garantire, allo stesso tempo, il mantenimento delle condizioni di adeguata qualità dell'aria per le persone che vi risiedono e lo smaltimento degli inquinanti che vengono generati nell'edificio. La ventilazione è assicurata, negli edifici privi di un sistema di ricambio d'aria meccanico, dalle infiltrazioni e dalle aperture volontarie di porte e finestre.

Tuttavia, le infiltrazioni non controllate devono essere ridotte al minimo per evitare dispersioni

termiche indesiderate durante l'inverno e guadagni termici non voluti durante l'estate. Gli standard di permeabilità all'aria negli edifici variano molto in Europa, ma generalmente oggi gli involucri edilizi presentano una tenuta all'aria sempre maggiore. La scelta tra ventilazione meccanica e naturale per gli edifici dipende dalle caratteristiche climatiche, dalla tenuta all'aria che è possibile raggiungere, dalla presenza di un sistema di recupero del calore e dalle preferenze degli utenti.

1.2.3. Altre strategie passive finalizzate alla rimozione del calore nella stagione estiva

È possibile adottare, soprattutto negli edifici localizzati in climi caratterizzati da estati molto calde, alcune strategie per l'esportazione del calore dall'edificio all'ambiente circostante nel periodo estivo. Queste strategie, sfruttando i principali "pozzi" ambientali (aria, cielo, acqua, suolo), comportano un limitato, se non nullo, consumo di energia. In particolare, in queste strategie sono inclusi: la ventilazione notturna, il raffrescamento radiativo, il raffrescamento evaporativo e il raffrescamento geotermico, illustrati in Figura 1.2 e in Figura 1.3.

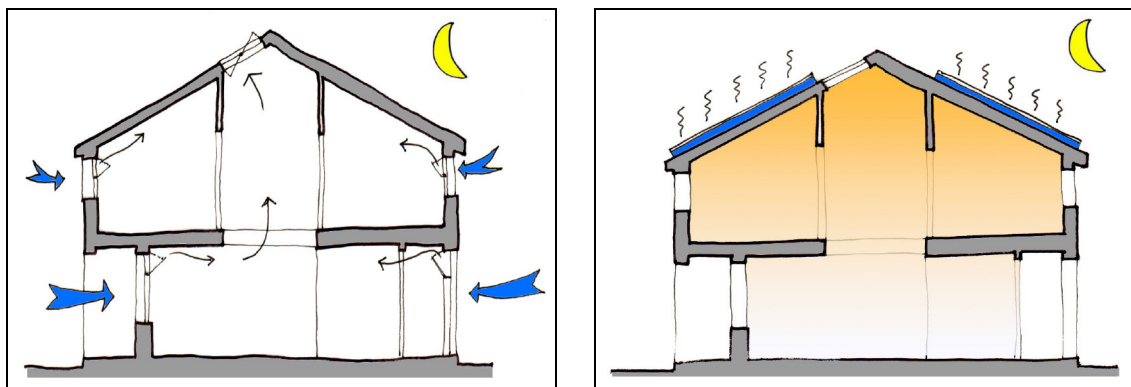


Figura 1.2 Schematizzazione delle strategie di ventilazione notturna, a sinistra, e di raffrescamento radiativo, a destra (fonte: Ford *et al.*, *The Passivhaus Standard in European warm climates. Part 3*, 2007).

Ventilazione notturna

In molte aree dell'Europa si manifesta, in estate, un'oscillazione diurna della temperatura dell'aria abbastanza elevata con temperature notturne che scendono al di sotto della temperatura di comfort. Quest'aria fredda può essere convogliata all'interno dell'abitazione per scaricare le strutture edilizie del calore immagazzinato durante il giorno e per utilizzare il benefico effetto dell'inerzia termica nel giorno successivo. Per garantire un raffrescamento efficace ed evitare discomfort locale durante la notte, è necessario prevedere un'organizzazione dei locali interni che non ostacoli i flussi d'aria diretti dalle aperture sopravento a quelle sottovento, permettere alle correnti d'aria di lambire la massa dell'edificio, dimensionare e gestire opportunamente (anche attraverso sistemi di automazione) le aperture.

La ventilazione naturale viene realizzata aprendo le finestre (o altre aperture apposite) nelle ore

notturne, quando la temperatura esterna è inferiore rispetto a quella interna (*free cooling*). Il flusso d'aria che si stabilisce tra l'interno e l'esterno è proporzionale alle dimensioni delle aperture, della loro posizione, alle differenze di temperatura e all'intensità del vento. L'utilizzo di un ventilatore potrebbe essere necessario qualora le condizioni al contorno non consentano lo sfruttamento della ventilazione naturale.

Raffrescamento radiativo

Un cielo notturno in condizioni di tempo sereno costituisce un potenziale pozzo di calore, sfruttabile mediante il meccanismo di scambio termico per irraggiamento attraverso cui la superficie relativamente calda del tetto trasmette calore verso la volta celeste fredda che lo sovrasta. In caso di coperture ben isolate questa strategia è meno efficace se usata direttamente, per cui sarebbe necessario individuare una tecnica per sfruttare questo potenziale di raffreddamento. Esempi di questa tecnica sono i “*roof-ponds*”.

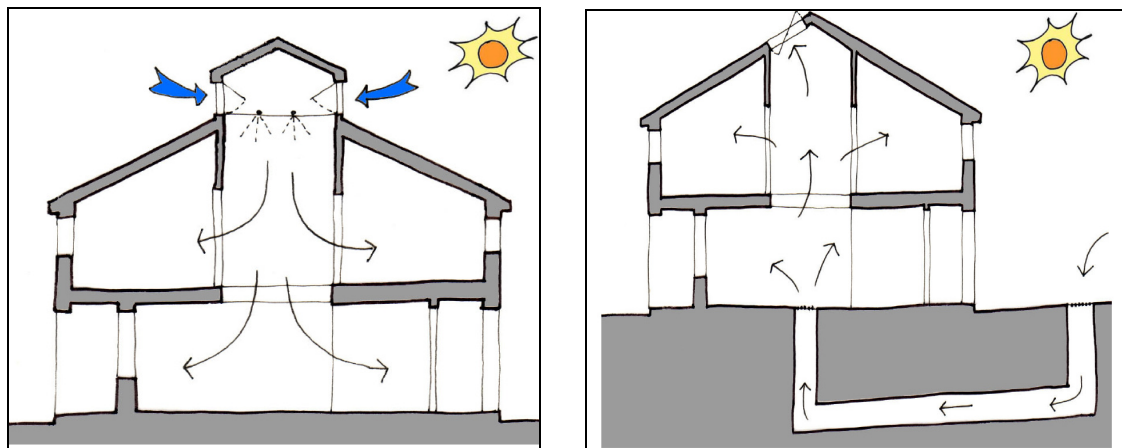


Figura 1.3 Schematizzazione delle strategie di raffrescamento evaporativo, a sinistra, e di raffrescamento geotermico, a destra (fonte: Ford *et al.*, *The Passivhaus Standard in European warm climates. Part 3*, 2007).

Raffrescamento evaporativo

Il potenziale di raffreddamento associabile all'acqua in evaporazione è stato sfruttato in molte aree dell'Europa del sud, del Medio Oriente e dell'India del nord. Come regola generale, è possibile ottenere una riduzione della temperatura dell'aria di ventilazione facendola entrare in contatto con acqua che, per evaporare, preleva dall'aria che la lambisce il calore latente necessario per il cambiamento di fase. Tale abbassamento di temperatura ovviamente è limitato quando l'aria è relativamente umida, ma può raggiungere i 10÷12 °C quando l'aria è relativamente secca. Per quanto riguarda il raffrescamento convettivo, il controllo della velocità di evaporazione e del flusso d'aria mediante aperture di ventilazione è fondamentale per ottimizzare le prestazioni ed evitare una sovraumidificazione.

Raffrescamento geotermico

A latitudini prossime a quella italiana, la temperatura del terreno per profondità maggiori a circa 6 m oscilla in modo limitato e tende alla temperatura media annua dell'aria esterna di circa 10÷12 °C. Il terreno è quindi un'enorme sorgente di energia termica a temperatura costante, che può essere sfruttata sia per il riscaldamento che per il raffrescamento degli edifici. Oltre ai già citati effetti sulla dissipazione dell'energia termica accumulata nei pavimenti, questa sorgente di calore e pozzo termico può, per esempio, essere sfruttata utilizzando sonde geotermiche verticali ad acqua che, collegate tramite scambiatore di calore ad un circuito interno di distribuzione, permettono di scaricare l'energia termica accumulata nelle solette edilizie dotate di pannelli radianti. Tale strategia di raffrescamento diretto può essere integrata da una pompa di calore, le cui prestazioni vengono notevolmente aumentate dallo sfruttamento del suolo, come pozzo-sorgente.

Un altro esempio di raffrescamento geotermico può essere realizzato utilizzando l'aria al posto dell'acqua. L'aria esterna, prima di essere introdotta in ambiente, viene pre-raffreddata convogliandola in canalizzazioni a contatto con il suolo.

1.2.4. Tecniche di isolamento termico

La strategia di controllo termico legata all'isolamento termico può essere ulteriormente approfondita in riferimento alle tecniche che possono essere applicate per ottenere determinate prestazioni; in particolare, pur mantenendo lo stesso livello di trasmittanza termica, la posizione dell'isolante influenza in modo significativo il comportamento del componente edilizio. In relazione a questo aspetto, esistono tre differenti tecniche di isolamento termico:

- isolamento dall'interno;
- isolamento in intercapedine;
- isolamento dall'esterno.

L'isolamento dall'interno consiste nell'applicazione dello strato isolante sulla superficie rivolta verso lo spazio riscaldato. È una tecnica consigliata per ambienti climatizzati saltuariamente nei quali la temperatura di regolazione dell'aria interna deve essere raggiunta rapidamente; infatti, l'isolamento posto all'interno riduce gli effetti dovuti all'inerzia termica della parete. I vantaggi di questo sistema riguardano i costi di realizzazione, che sono contenuti, e la rapidità di messa in opera; inoltre, è una tecnica ideale per interventi di ristrutturazione, quando non è possibile intervenire dall'esterno. Tuttavia, l'isolamento dall'interno è quello che presenta maggiori svantaggi, poiché determina la probabile insorgenza di problemi di condensazione e, pur eliminando i ponti termici dei pilastri, non risolve quelli delle solette dei vari piani.

L'isolamento in intercapedine rappresenta una soluzione di compromesso, mediante l'inserimento dell'isolante nell'intercapedine tra il tamponamento esterno e la muratura interna. In

Italia è la tipologia da sempre più diffusa, che ha rappresentato una significativa evoluzione della parete perimetrale da elemento monolitico a unità tecnologica pluristrato. Il sistema presenta i seguenti vantaggi:

- l'accumulo termico nella parete interna più leggera è limitato, il che garantisce una più rapida messa a regime della temperatura ambientale quando l'impianto di climatizzazione è intermittente o attenuato;
- garantisce una maggiore impermeabilità all'aria e all'acqua, e il fattore preponderante che rende la parete impermeabile all'acqua è l'intercapedine d'aria;
- riduce la possibilità di condensa superficiale;
- dal punto di vista del comfort acustico, consente un efficace abbattimento del rumore alle diverse frequenze grazie alla struttura della parete che presenta due strati con diversa massa;
- potrebbe garantire la riduzione dei ponti termici, in special modo quelli connessi con le solette dei vari piani se posizionato con continuità lungo tutta l'altezza dell'edificio. In questo caso la parete interna svolge funzione strutturale e la parete esterna è un semplice tamponamento.

L'isolamento dall'esterno è la soluzione tra tutte più efficace. Poiché la massa è posizionata verso l'interno, questa tecnica è consigliata per ambienti riscaldati in continuo con interruzione notturna. Durante il funzionamento dell'impianto si ha un notevole accumulo di calore nelle pareti, sfruttando l'inerzia termica delle stesse; il rilascio di calore avviene nelle ore notturne, con il riscaldamento spento, migliorando notevolmente il comfort termico. In estate, il calore rilasciato dalla massa termica durante la notte deve però essere asportato prevedendo, ad esempio, un sistema di ventilazione naturale.

Una particolare tipologia di isolamento dall'esterno è la tecnologia "a cappotto"; si tratta di un sistema che si è sviluppato in Europa negli ultimi quarant'anni e consiste nell'applicazione, sull'intera superficie esterna verticale dell'edificio, di pannelli di materiale isolante che vengono coperti da uno spessore sottile, protettivo, di finitura esterna, realizzato solitamente con intonaci particolari. La tecnica "a cappotto" isola in modo continuo ed uniforme, consentendo la risoluzione dei ponti termici, riducendo le dispersioni termiche e determinando di conseguenza un maggiore risparmio energetico, un maggiore comfort termico e la limitazione del rischio di formazione di condensa in prossimità dei ponti termici. Tuttavia, per ottenere un sistema "a cappotto" efficace bisogna prestare la massima attenzione alle caratteristiche dei singoli componenti, in particolare del materiale isolante.

L'isolante deve essere stabile dal punto di vista dimensionale al variare della temperatura e

dell'umidità; infatti, eventuali dilatazioni generate da variazioni termo-igrometriche potrebbero provocare delle fessurazioni sull'intonaco, nel caso in cui il materiale isolante non sia stabile. Il materiale deve essere stabile anche nel tempo, lavorabile e presentare una bassa elasticità compatibilmente con la resistenza meccanica dell'insieme; questo permette di rendere relativamente indipendenti le due strutture rigide costituite dalla parete e dall'intonaco esterno.

1.2.5. Dall'edificio passivo allo *Standard Passivhaus*

Nell'Europa Centrale l'espressione "Casa Passiva" è fortemente legata allo *Standard Passivhaus*. Negli anni Novanta il progetto dell'edificio passivo è stato codificato nello *Standard Passivhaus* da Wolfgang Feist a partire da alcuni primi esemplari di case passive costruite in Germania (Darmstadt e Groß-Umstadt). Lo Standard proponeva, tra l'altro, limiti molto severi sul fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento e sulla quantità di energia primaria per tutti gli usi finali (riscaldamento degli ambienti, elettrodomestici, illuminazione e produzione di acqua calda sanitaria) e un requisito di qualità (livello di comfort termico). Il requisito di tipo energetico viene espresso sia in termini di fabbisogno di energia per il riscaldamento, fissato ad un valore limite di 15 kWh/(m² anno), sia in termini di consumo totale di energia primaria, fissato ad un valore limite di 120 kWh/(m² anno). Il requisito energetico può essere rispettato in modo da essere sostenibile economicamente grazie ad un insieme integrato di sistemi passivi preferenziali, che includono forma compatta dell'abitazione, un livello elevato di isolamento termico, un'attenzione particolare rivolta all'orientamento e alla corretta schermatura delle superfici trasparenti, elevata tenuta all'aria dell'involucro edilizio, pre-riscaldamento passivo dell'aria immessa e recupero di calore ad alta efficienza dall'aria espulsa, utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Lo *Standard Passivhaus*, inizialmente focalizzato sulla domanda energetica e sul comfort termico invernale, è stato recentemente esteso anche alla considerazione del fabbisogno energetico e del benessere termico nei mesi estivi e nei climi del Sud Europa. Attraverso il progetto "Passive-on" (2004-2007), finanziato dal programma "*Intelligent Energy Europe*", è stata formulata una proposta di adattamento dello Standard alle condizioni che caratterizzano il contesto dei Paesi del Sud Europa. In queste regioni il problema dell'uso di energia negli edifici residenziali non è solo quello di riscaldare d'inverno, ma anche, ed in alcuni casi risulta anche più importante, quello di raffrescare d'estate, riducendo al minimo le richieste energetiche.

Il progetto "Passive-on" ha proposto un numero di cambiamenti allo Standard corrente di *Passivhaus* tedesca, per adattarlo a climi più caldi. L'obiettivo è quello di permettere ai progettisti nel Sud Europa di adottare progettazioni passive appropriate alla regione, garantendo al tempo stesso risultati in termini di qualità energetica e di comfort interno. I cambiamenti di principio mirati a rendere lo *Standard Passivhaus* idoneo al clima mediterraneo sono:

- rimuovere il fabbisogno di ventilazione attiva e di unità di scambiatori di calore.

Tuttavia, nel caso in cui essi risultino necessari, il limite sulla tenuta all'aria dell'involucro edilizio è meno restrittivo ($n_{50} \leq 1 \text{ h}^{-1}$);

- introdurre un limite esplicito per il fabbisogno di raffrescamento, fissato a $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$. Tuttavia i sistemi di condizionamento attivi dovrebbero essere utilizzati solo quando strettamente necessario. Si raccomanda sempre il raffrescamento passivo nelle abitazioni ove sia possibile;
- condizioni di comfort interno accettabili nei climi caldi con requisiti minimi per il comfort estivo; in particolare, le temperature estive interne non devono superare la temperatura di comfort adattativo come definita nella norma EN 15251. Usando il modello di comfort adattativo si assicurano temperature di comfort compatibili con la progettazione passiva.

All'interno del progetto "Passive-on" ogni nazione partecipante (Francia, Spagna, Portogallo, Italia e Regno Unito) ha applicato lo *Standard Passivhaus* all'interno della proprio contesto climatico e socio-economico. L'analisi ha rivelato che risulta generalmente possibile limitare senza troppa difficoltà i carichi termici nei paesi del Sud Europa a meno di $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$. Carichi così ridotti diventano quindi marginali rispetto ad altri fabbisogni energetici delle abitazioni, come l'acqua calda sanitaria e le apparecchiature domestiche. Il risultato interessante riguarda l'analisi dei carichi di raffrescamento che spesso possono essere fronteggiati con le sole strategie passive. Ciò ha condotto ad un'ampia gamma di soluzioni progettuali, che si riflettono nelle proposte delle varie Nazioni. In generale emerge che è possibile progettare, adottando le soluzioni appropriate, abitazioni confortevoli a basso consumo energetico nelle quali è possibile talvolta evitare l'impiego di sistemi di raffrescamento attivi.

La *Passivhaus* italiana nasce dalla premessa che le soluzioni progettuali comunemente implementate per le *Passivhaus* dell'Europa Centrale – tipicamente basate su un isolamento elevato dell'involucro, assenza di ponti termici e ventilazione forzata con recupero di calore – sono riproponibili nelle zone italiane caratterizzate da inverni relativamente rigidi, come Milano e, in generale, tutto il nord, ma anche come le regioni montane del sud, e possono, se integrate con soluzioni aggiuntive, fornire una strategia efficace per il raffrescamento passivo estivo. La *Passivhaus* italiana adotta le seguenti soluzioni aggiuntive:

- l'ombreggiamento delle finestre per ridurre i guadagni solari;
- una strategia di ventilazione notturna, integrata nei giorni particolarmente caldi da raffrescamento attivo fornito da una pompa di calore reversibile a bassa potenza.

Attraverso gli studi condotti sul territorio italiano, alcune specifiche di dettaglio riferite allo standard *Passivhaus* sono state modificate. In generale il clima più mite presente in Italia permette di raggiungere i limiti energetici e di comfort utilizzando criteri meno stringenti per quanto riguarda:

- i livelli di isolamento, che possono ridursi rispetto ad una tipica *Passivhaus* tedesca;
- riguardo alla tenuta all'aria dell'involucro, lo standard e la buona pratica dell'Europa Centrale richiedono che gli involucri edilizi limitino il ricambio d'aria a un massimo di $0,6 \text{ h}^{-1}$ per una differenza di pressione di 50 Pa ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$), mentre a Milano e Roma il limite di n_{50} pari a 1 h^{-1} dovrebbe risultare accettabile, e anche troppo conservativo a Palermo.

In particolare, per la stagione invernale (cfr. Figura 1.4) la *Passivhaus* italiana:

- minimizza le perdite di calore invernali grazie a un involucro altamente isolato e all'eliminazione dei ponti termici;
- fornisce ventilazione forzata con recupero di calore dall'aria esausta;
- fornisce riscaldamento attivo utilizzando una pompa di calore geotermica a bassa potenza (carico termico massimo in inverno ed estate intorno a 1,5 kW);
- permette guadagni solari utilizzando la porzione vetrata (circa 30%) delle superfici rivolte a sud e riduce le perdite limitando le superfici vetrate a nord.

Per la stagione estiva (cfr. Figura 1.4) la *Passivhaus* italiana:

- minimizza i guadagni solari grazie a un involucro isolato e all'ombreggiamento delle finestre;
- asporta i guadagni solari diurni e quelli interni accumulati nelle strutture edilizie utilizzando una strategia notturna di ventilazione ibrida (naturale e forzata).

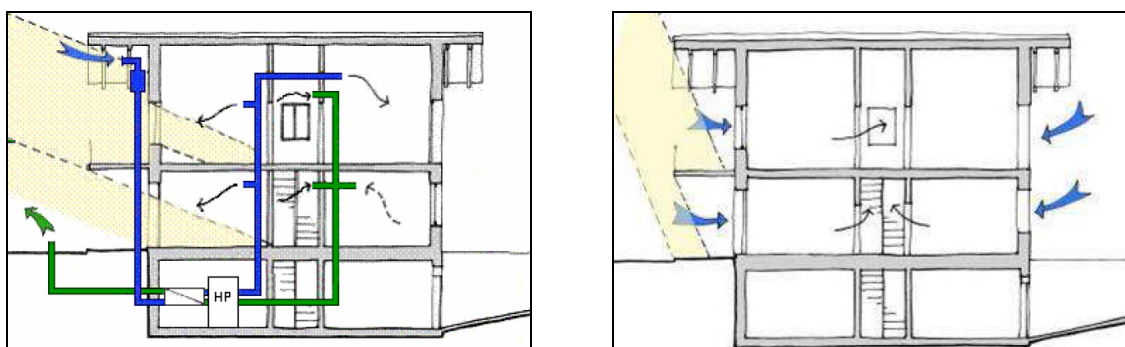


Figura 1.4 Strategie invernali (a sinistra) ed estive (a destra) utilizzate nella *Passivhaus* italiana (fonte: Ford *et al.*, *The Passivhaus Standard in European warm climates. Part 1*, 2007).

A tal proposito si evidenzia che usando una struttura pesante e ben isolata, si ottiene una condizione idonea allo sfruttamento del raffrescamento notturno estivo della massa termica dell'edificio. L'aria di notte viene fatta circolare attraverso l'edificio, per azione del vento o di gradienti naturali di densità, oppure utilizzando i ventilatori del sistema di ventilazione forzata. Si è

dimostrato che tale strategia funziona bene a Milano, anche se è più efficace a Roma; mentre a Palermo la strategia di ventilazione naturale è meno efficace e si rende necessaria qualche forma di raffrescamento attivo per garantire le condizioni di comfort ambientale.

1.3. Stato dell'arte: ricerca bibliografica

La letteratura in materia energetica edilizia sottolinea come l'uso del materiale isolante termico sia da sempre considerato la tecnica più efficace per incrementare la resistenza termica di un componente edilizio in condizioni di sollecitazione termica dinamica; in particolar modo, alcuni studi si fondano sulla tecnologia di isolamento termico e indagano l'approccio finalizzato a ridurre i carichi di raffrescamento attraverso l'installazione di uno strato di isolamento di elevato spessore: la tecnica migliore per ridurre la potenza frigorifera di picco e il fabbisogno medio di raffrescamento si fonda sul posizionamento dello strato di isolamento termico sulla superficie esterna dell'involucro; tuttavia, in edifici con temperatura interna fissata ad un livello superiore di quella dell'ambiente circostante, si dimostra che è più efficace l'inserimento di materiale isolante sulla faccia interna della parete (Al Turki *et al.*, 1991).

La consapevolezza della scarsità delle risorse energetiche e la conseguente attenzione verso la limitazione dei consumi energetici hanno sviluppato nuovi studi sull'isolamento termico, che si trovano concordi sul concetto che l'utilizzo consapevole dell'isolamento termico negli edifici non contribuisce unicamente alla riduzione della potenza frigorifera, ma anche al costo energetico annuale; inoltre, è stato dimostrato che l'entità del risparmio energetico in risposta all'utilizzo dell'isolamento termico è variabile in funzione del tipo di edificio, delle condizioni climatiche caratterizzanti il sito e della tipologia di materiale isolante utilizzato. La tipologia edilizia ha un ruolo fondamentale nella determinazione dell'efficacia dell'isolamento termico sulla prestazione energetica dell'edificio; è emerso che l'utilizzo di una maggior quantità di materiale isolante ha un'influenza maggiore negli edifici che non sono dominati dagli apporti termici interni, ma nei quali l'involucro ha un peso preponderante sulla prestazione energetica (Al-Homoud, 2005).

La maggior parte degli studi sull'isolamento termico focalizza l'attenzione sulle modalità più efficaci per risparmiare energia elettrica riducendo i picchi del carico di raffrescamento dell'edificio e individua nel materiale isolante e nell'utilizzo di schermature solari una possibile soluzione, determinando lo spessore ottimale del materiale isolante, sia per usi civili che per applicazioni industriali, e mettendo in relazione spessore di materiale e risparmio economico (Al-Sanea *et al.*, 2002; Bolattürk, 2008). Altri studi, invece, sono improntati piuttosto sull'analisi del ciclo di vita del materiale e mettono a confronto le prestazioni termiche e gli impatti ambientali di varie tipologie di materiali isolanti (Papadopoulos *et al.*, 2007).

Sebbene il filo conduttore di tutte le indagini sia l'utilizzo del materiale isolante al fine di ridurre i consumi energetici, l'applicazione relativa al miglioramento della prestazione termica degli edifici in estate, utilizzando un adeguato isolamento termico, non è analizzata in maniera considerevole, salvo rare eccezioni (Al-Khawaja, 2004). Si tratta tuttavia di studi molto eterogenei, in cui l'effetto dell'isolamento termico è analizzato in associazione ad altri singoli aspetti che

determinano la prestazione energetica estiva degli edifici, ma mai in un contesto completo, rappresentato dalla relazione tra tutte le sollecitazioni termiche dinamiche dell'ambiente interno ed esterno che influenzano i termini del bilancio di energia termica dell'edificio. Infatti, le ricerche condotte, pur considerando tutti i contributi alla determinazione del fabbisogno energetico o della potenza di picco, non ne indagano le interrelazioni e le specifiche influenze sulla prestazione energetica estiva in funzione del livello di isolamento termico dell'involucro edilizio.

Gli effetti sulla prestazione termica estiva determinati dai parametri che non sono necessariamente legati all'involucro, ma si relazionano con il livello di isolamento termico dello stesso, sono analizzati spesso separatamente; alcuni esempi sono il contributo degli apporti interni, che deve essere valutato attentamente per una previsione realistica del fabbisogno energetico (Hoes *et al.*, 2009), oppure l'utilizzo della ventilazione naturale, intesa come tecnica efficace per la riduzione del fabbisogno di raffrescamento (Ghiaus *et al.*, 2006), o ancora, l'influenza della dimensione delle superfici trasparenti e dell'orientamento delle stesse per il controllo degli apporti solari in edifici caratterizzati dall'iper-isolamento delle strutture d'involucro (Persson *et al.*, 2006).

La corretta progettazione dell'involucro edilizio è un tema ampiamente trattato in letteratura: alcuni studi confrontano varie soluzioni costruttive in dati contesti climatici per individuare la soluzione che coniuga l'efficienza energetica con la sostenibilità ambientale (Pulselli *et al.*, 2009); altre analisi individuano i parametri che hanno un'influenza sul progetto dell'involucro con la finalità di proporre un approccio di progettazione finalizzato a garantire un elevato livello di comfort interno (Oral *et al.*, 2004); tuttavia, in alcuni casi non vengono tenuti in considerazione altri aspetti che incidono sulla prestazione energetica dell'edificio e che si relazionano anche con l'involucro edilizio, ovvero gli effetti legati alla gestione dell'edificio e quindi al ruolo dell'utenza.

I fattori che sono determinanti per la progettazione dell'involucro edilizio sono classificati in due gruppi, parametri correlati all'ambiente esterno e parametri correlati all'ambiente costruito (Oral *et al.*, 2004). Tra i parametri correlati all'ambiente esterno si annoverano la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare, l'umidità relativa dell'aria esterna, la velocità del vento. I parametri progettuali legati all'ambiente costruito sono ulteriormente suddivisi in parametri del contesto esterno (dimensione e orientamento degli ostacoli esterni, riflessione della radiazione solare sulle superfici circostanti, natura del terreno), parametri alla scala dell'edificio (orientamento, posizione dell'edificio nei confronti di altri edifici, forma dell'edificio), parametri alla scala del singolo locale (orientamento e dimensione dei singoli ambienti, coefficiente di assorbimento solare delle superfici interne in riferimento alla radiazione solare che entra in ambiente dalle finestre), parametri alla scala del componente edilizio. Questi ultimi si suddividono ulteriormente in proprietà dell'involucro opaco e proprietà dell'involucro trasparente. Per l'involucro opaco si fa riferimento alle caratteristiche dei materiali costituenti (spessore, massa volumica, calore specifico, conduttività termica, ruvidezza della superficie, coefficienti di assorbimento e di riflessione solare della superficie); per l'involucro

trasparente si considerano le proprietà dei componenti (dimensioni, numero di vetrate, conduttività termica del vetro, coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione solare del vetro, conduttività termica del telaio, etc.).

Gli studi più rappresentativi che relazionano gli effetti dell'isolamento termico alla prestazione termica estiva e alle altre variabili che entrano in gioco nella determinazione della prestazione stessa sono rivolti principalmente agli edifici passivi; si annoverano, in particolar modo, gli studi italiani che si sono sviluppati all'interno del progetto "Passive-on" (cfr. par. 1.2.5). Sono stati valutati la prestazione energetica e l'andamento della temperatura interna di edifici in diverse località, applicando differenti spessori di isolamento termico, in relazione agli orientamenti dell'edificio, all'utilizzo di schermature solari, all'introduzione di tassi di ventilazione in *free cooling* (Giovanardi *et al.*, 2008).

A partire da queste considerazioni avanzate a valle della ricerca bibliografica è sviluppata l'analisi, con l'obiettivo di ampliare la "settorialità" che spesso caratterizza gli studi sull'involucro edilizio e sull'isolamento termico; gli effetti dell'isolamento sul comportamento termico estivo sono indagati attraverso un'analisi più estesa, in cui entrano in gioco tutti gli aspetti che influenzano la prestazione energetica degli edifici.

2. Una nuova modalità di analisi termica dell'edificio

Nel presente capitolo è descritta una nuova metodologia d'indagine che si basa sull'analisi del bilancio di energia termica dell'aria interna e sullo studio dei vari contributi e delle interrelazioni con riferimento alle diverse condizioni al contorno. Si tratta di un'analisi finalizzata a individuare principalmente un metodo di rappresentazione degli aspetti che maggiormente influenzano la prestazione termica di un edificio, in particolar modo in condizioni estive; a partire da questi aspetti è possibile, da un lato avanzare considerazioni finalizzate allo studio dell'effetto dell'isolamento termico nel comportamento termico estivo dell'edificio, dall'altro operare opportune strategie di intervento per minimizzare il fabbisogno di energia per il raffrescamento, soprattutto in caso di un elevato livello di isolamento termico.

La metodologia d'indagine può trovare molteplici applicazioni, prime fra tutte la progettazione termo-fisica degli edifici e la diagnosi energetica. Un esempio di questa applicazione è riportato in seguito nella trattazione del par. 2.3. Un altro possibile impiego del metodo, illustrato al par. 2.4, risiede nel confronto di modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici: l'indagine è stata applicata per confrontare un metodo di calcolo dettagliato in regime dinamico con un metodo semplificato in regime quasi-stazionario, per porre le basi alla validazione di quest'ultimo.

2.1. I termini del bilancio energetico e le sollecitazioni termiche dinamiche dell'edificio

2.1.1. L'impostazione metodologica

La prestazione termica dell'edificio è determinata attraverso l'equazione di bilancio energetico; ad essa contribuiscono, infatti, l'energia termica trasmessa attraverso l'involucro, la quota di ventilazione, gli apporti solari e gli apporti interni. Nell'analisi si fa riferimento alla sola energia termica sensibile, seguendo l'approccio della normativa internazionale (EN ISO 13790).

La metodologia di indagine proposta prende avvio dall'analisi, da un lato dei termini costituenti l'equazione di bilancio termico dell'edificio, dall'altro delle sollecitazioni termiche e del loro effetto sui termini del bilancio stesso. L'espressione dell'equazione di bilancio termico in funzione delle sollecitazioni dinamiche dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno è necessaria per individuare gli elementi che maggiormente influenzano la prestazione termica degli edifici in funzione delle condizioni al contorno.

Le sollecitazioni termiche, o condizioni al contorno, comprendono il microclima esterno, il microclima interno e il profilo di utilizzo dell'edificio, secondo quanto illustrato in Figura 2.1, nella quale sono anche raffigurati i termini del bilancio energetico, comprendenti il flusso termico generato dalle sorgenti interne (Φ_{int}), il flusso termico trasmesso attraverso gli elementi d'involucro opaco e

trasparente (Φ_{tr}), il flusso termico di ventilazione (Φ_{ve}) e il flusso solare entrante in ambiente dagli elementi d'involucro (Φ_{sol}). Il mantenimento delle condizioni interne (es. temperatura interna, T_i) è garantito dall'altro termine rappresentato, ovvero la potenza termica netta di riscaldamento/raffrescamento ($\Phi_{H/C}$) indicante la prestazione termica invernale/estiva dell'edificio.

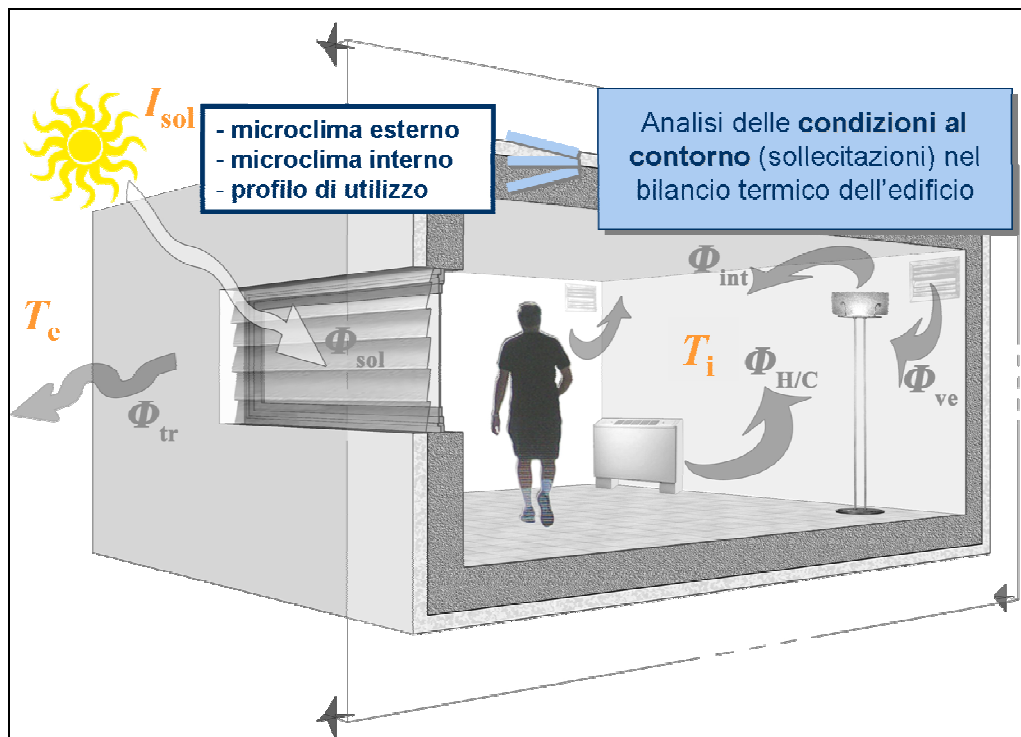


Figura 2.1 Termini del bilancio di energia dell'edificio e delle sollecitazioni termiche dinamiche dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno.

I termini del bilancio termico sono il risultato dell'effetto delle sollecitazioni termiche, che vanno a determinare il fabbisogno di energia dell'edificio, sia interagendo con i componenti dell'involucro, sia non rapportandosi ad essi (es. sorgenti interne di calore). A partire da questa considerazione, è proposto un procedimento d'analisi strutturato su tre diversi livelli, operanti in sequenza (cfr. da Figura 2.2 a Figura 2.4).

Il primo livello, rappresentato in Figura 2.2, mira a quantificare l'importanza del progetto dell'involucro nel suo complesso: esso riguarda lo studio dell'influenza dell'involucro edilizio sulla prestazione energetica dell'edificio, al variare delle condizioni al contorno (cfr. Figura 2.1) e della geometria dell'edificio; quest'ultima è rappresentata principalmente dal rapporto di forma, determinato dal rapporto tra la superficie disperdente e il volume lordo dello spazio climatizzato.

Il secondo livello di indagine, rappresentato in Figura 2.3, mira a quantificare l'importanza del progetto dell'involucro opaco: esso considera l'effetto dell'involucro opaco sulla prestazione energetica dell'edificio. Tale effetto è influenzato dall'estensione della superficie trasparente – che

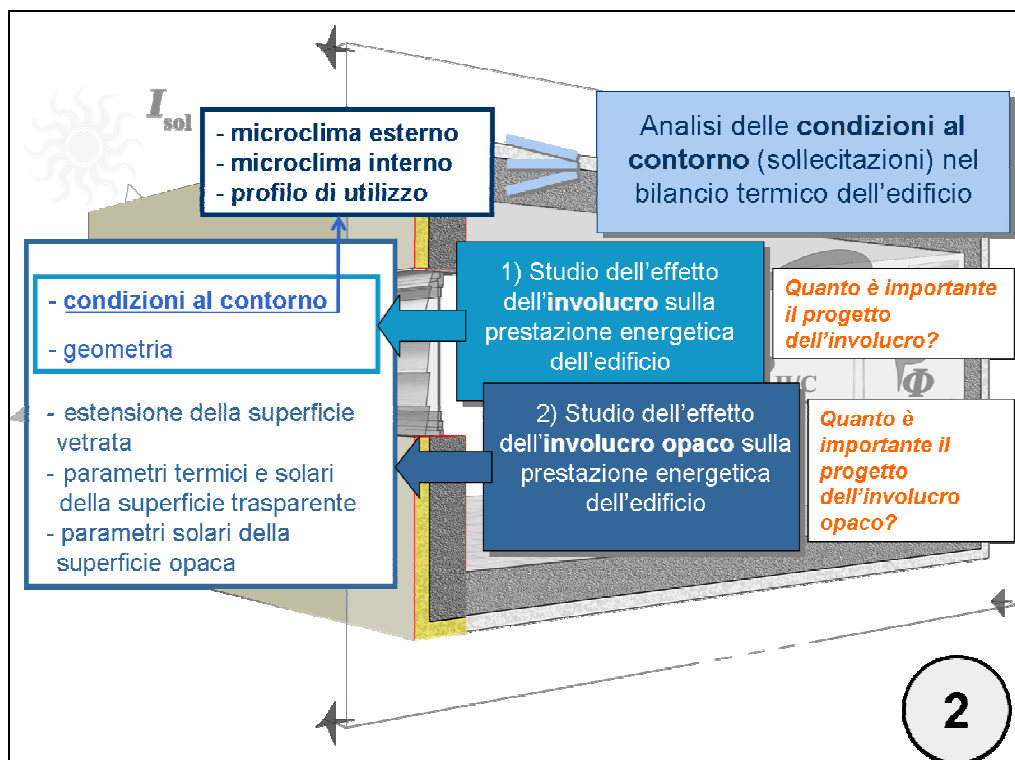


Figura 2.3 Aspetti caratterizzanti l'influenza dell'involucro opaco sulla prestazione energetica dell'edificio (secondo livello d'indagine).



Figura 2.4 Aspetti caratterizzanti l'influenza dell'isolamento termico dell'involucro opaco sulla prestazione energetica dell'edificio (terzo livello d'indagine).

2.1.2. I contributi al bilancio termico dell'aria interna

Lo studio dei contributi al bilancio termico dell'aria ambiente parte dall'applicazione dell'equazione di bilancio termico convettivo sull'aria interna:

$$\Phi_{\text{conv}} + \Phi_V + \Phi_{\text{conv,IG}} + \Phi_C = C_{\text{ai}} \cdot \frac{dT_{\text{ai}}}{d\tau} \quad (2.1)$$

dove, Φ_{conv} è il flusso termico scambiato per convezione con le superfici dell'ambiente interno, Φ_V è il flusso termico legato alle infiltrazioni e alla ventilazione, $\Phi_{\text{conv,IG}}$ è il flusso termico convettivo ceduto all'ambiente dalle sorgenti interne di calore, Φ_C è il flusso termico convettivo sottratto all'ambiente dall'impianto di raffrescamento, C_{ai} è la capacità termica dell'aria interna, T_{ai} è la temperatura dell'aria interna, τ è il tempo.

La quota Φ_{conv} può essere ulteriormente scorporata in relazione alla tipologia di superficie su cui avviene lo scambio termico con l'aria interna, distinguendo tra le superfici opache d'involucro ($\Phi_{\text{conv,OE}}$), le superfici trasparenti d'involucro ($\Phi_{\text{conv,W}}$), le superfici opache costituenti gli elementi edilizi interni ($\Phi_{\text{conv,OI}}$, es. pareti divisorie e solai interpiano). Le superfici d'involucro potrebbero essere ulteriormente suddivise a seconda del tipo di ambiente confinante, ossia l'ambiente esterno, il terreno, un ambiente non climatizzato, un ambiente climatizzato a temperatura differente.

La metodologia d'analisi termica precedentemente proposta si basa sull'espressione dei termini del bilancio termico in funzione delle varie sollecitazioni dinamiche dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno, al fine di individuare gli elementi che maggiormente influenzano la prestazione termica dell'edificio in determinate condizioni; si opera quindi una scomposizione di ciascun effetto, cioè di ogni contributo al bilancio termico dell'aria interna, in relazione alle cause che lo determinano, vale a dire le sollecitazioni termiche, tra le quali la temperatura esterna, la radiazione solare e le sorgenti di calore interne.

Tabella 2.1 Relazione di dipendenza di ciascun termine del bilancio dalle sollecitazioni termiche dinamiche.

	Temperatura esterna			Sorgenti termiche interne	Radiazione solare	
	in riferimento alla trasmissione termica dei componenti d'involucro opaco ($T_{tr,op}$)	in riferimento alla trasmissione termica dei componenti d'involucro trasparente ($T_{tr,w}$)	in riferimento alla ventilazione (T_{ve})	(Int)	incidente su superfici opache (Sol_{op})	incidente su superfici trasparenti (Sol_w)
$\Phi_{\text{conv,OE}}$	X	X	-	X	X	X
$\Phi_{\text{conv,W}}$	X	X	-	X	X	X
$\Phi_{\text{conv,OI}}$	X	X	-	X	X	X
$\Phi_{\text{conv,IG}}$	-	-	-	X	-	-
Φ_V	-	-	X	-	-	-

In Tabella 2.1 vengono individuate le dipendenze di ciascun termine dell'equazione di bilancio termico dalla relativa sollecitazione; le relazioni possono essere così riassunte:

- il contributo del flusso termico convettivo relativo alle superfici d'involucro opaco ($\Phi_{\text{conv,OE}}$) al bilancio termico dell'aria interna è dipendente dalle seguenti condizioni al contorno:
 - dalla temperatura dell'aria esterna che determina la trasmissione del calore attraverso i componenti d'involucro opaco ($T_{tr,op}$). Il flusso termico scambiato con l'ambiente esterno è trasferito all'aria interna per convezione termica dalle superfici interne degli elementi d'involucro opaco;
 - dalla temperatura dell'aria esterna che determina la trasmissione del calore attraverso i componenti d'involucro trasparente ($T_{tr,w}$). Il flusso termico scambiato con l'ambiente esterno dai serramenti è trasferito dalla loro superficie interna alle superfici interne dell'involucro opaco per irraggiamento termico, e da queste superfici è scambiato con l'aria interna per convezione termica;
 - dalla quota radiativa delle sorgenti termiche interne (Int) che viene trasferita per irraggiamento termico alle superfici interne dei componenti d'involucro opaco e da queste all'aria interna per convezione termica;
 - dalla radiazione solare incidente sulle superfici esterne dei componenti d'involucro opaco (Sol_{op}) che viene assorbita dagli elementi opachi stessi e successivamente trasmessa all'interno. L'aumento di temperatura all'interno dei componenti determina una cessione di energia termica all'aria interna per convezione termica dalle superfici interne dei componenti stessi;
 - dalla radiazione solare entrante attraverso i componenti d'involucro trasparente (Sol_w) che viene assorbita dalle superfici interne degli elementi d'involucro opaco. L'aumento di temperatura all'interno dei componenti determina una cessione di energia termica all'aria interna per convezione termica dalle superfici interne dei componenti stessi;
- il contributo del flusso termico convettivo relativo alle superfici d'involucro trasparente ($\Phi_{\text{conv,W}}$) al bilancio termico dell'aria interna è dipendente dalle seguenti condizioni al contorno:
 - dalla temperatura dell'aria esterna che determina la trasmissione del calore attraverso i componenti d'involucro opaco ($T_{tr,op}$). Il flusso termico scambiato con l'ambiente esterno è trasferito dalle superfici interne dei componenti d'involucro opaco alle superfici interne dei componenti d'involucro trasparente per irraggiamento termico e da queste all'aria interna per convezione termica;
 - dalla temperatura dell'aria esterna che determina la trasmissione del calore attraverso i componenti d'involucro trasparente ($T_{tr,w}$). Il flusso termico scambiato con l'ambiente esterno è trasferito all'aria interna per convezione termica dalle superfici interne degli elementi d'involucro trasparente;

- dalla quota radiativa delle sorgenti termiche interne (*Int*) che viene trasferita per irraggiamento termico alle superfici interne dei componenti d'involucro trasparente e da queste all'aria interna per convezione termica;
 - dalla radiazione solare incidente sulle superfici esterne dei componenti d'involucro opaco (*Sol op*) che, assorbita dagli elementi d'involucro opaco, ne aumenta la temperatura, determinando lo scambio termico per irraggiamento con le superfici interne dei componenti d'involucro trasparente ed un conseguente scambio termico convettivo tra le superfici interne degli elementi d'involucro trasparente e l'aria interna;
 - dalla radiazione solare incidente sulle superfici esterne dei componenti d'involucro trasparente (*Sol w*) che, in parte contribuisce all'aumento di temperatura all'interno del componente trasparente e determina lo scambio termico convettivo con l'aria interna, in parte viene trasferita all'interno, riflessa e assorbita dalle superficie interne e successivamente dalle superfici interne dei componenti d'involucro trasparente ceduta all'aria per convezione termica;
- il contributo del flusso termico convettivo relativo alle superfici degli elementi edilizi interni ($\Phi_{\text{conv,OI}}$) al bilancio termico dell'aria interna è dipendente dalle seguenti condizioni al contorno:
- dalla temperatura dell'aria esterna che determina la trasmissione del calore attraverso i componenti d'involucro opaco (*T tr,op*). Il flusso termico scambiato con l'ambiente esterno è trasferito dalle superfici interne dei componenti d'involucro opaco alle superfici degli elementi edilizi interni per irraggiamento termico e da queste superfici è trasferito all'aria interna per convezione termica;
 - dalla temperatura dell'aria esterna che determina la trasmissione del calore attraverso i componenti d'involucro trasparente (*T tr,w*). Il flusso termico scambiato con l'ambiente esterno è trasferito dalle superfici interne dei componenti d'involucro trasparente alle superfici degli elementi edilizi interni per irraggiamento termico e da queste superfici è trasferito all'aria interna per convezione termica;
 - dalla quota radiativa delle sorgenti termiche interne (*Int*) che viene trasferita per irraggiamento termico alle superfici degli elementi edilizi interni e da queste superfici è trasferita all'aria interna per convezione termica;
 - dalla radiazione solare incidente sulle superfici esterne dei componenti d'involucro opaco (*Sol op*) che viene assorbita dagli elementi d'involucro opaco stessi e successivamente trasmessa all'interno. L'aumento di temperatura all'interno dei componenti determina lo scambio termico per irraggiamento con le superfici degli elementi edilizi interni ed un conseguente scambio termico convettivo tra le superfici degli elementi edilizi interni e l'aria interna;

- dalla radiazione solare entrante attraverso i componenti d'involucro trasparente (*Sol w*) che viene assorbita dalle superfici degli elementi edilizi interni. L'aumento di temperatura all'interno di questi elementi determina una cessione di energia termica all'aria interna per convezione termica;
- il contributo del flusso termico convettivo relativo agli apporti interni ($\Phi_{\text{conv,IG}}$) è generato dalle sorgenti interne di calore di natura convettiva (*Int*) e costituisce carico diretto sull'aria ambiente;
- il contributo del flusso termico convettivo relativo alla ventilazione (Φ_v) è di natura convettiva ed è determinato dalla temperatura dell'aria esterna (*T_{ve}*).

2.2. Lo sviluppo della metodologia d'indagine attraverso uno strumento di simulazione numerica dettagliata

L'analisi termica è sviluppata attraverso l'impiego di un codice di simulazione numerica in regime dinamico, il software *EnergyPlus*. Di seguito sono presentate le principali caratteristiche del codice di simulazione numerica e viene descritta la sua particolare applicazione finalizzata a rispondere agli obiettivi della metodologia di indagine.

2.2.1. Il software *EnergyPlus*

EnergyPlus è un codice di simulazione termo-energetica degli edifici a struttura modulare, realizzato nel 2001, a seguito di un lavoro iniziato nel 1996, dall'*US Department of Energy*, dal *Cerl* (*US Army Construction Engineering Research Laboratories*), dall'Università dell'Illinois, dal *Lawrence Berkeley National Laboratory*, dall'Università statale dell'Oklahoma e dalla *Gard Analytics*.

EnergyPlus nasce come un programma innovativo a partire da due noti software di simulazione numerica statunitensi, *Doe-2* e *Blast*, elaborati rispettivamente dal Ministero dell'Energia (*Department of Energy*, Doe) e dal Ministero della Difesa (*Department of Defence*, Dod). Oltre vent'anni di aggiornamenti di questi due programmi avevano portato, infatti, a centinaia di *subroutines* difficili da gestire nelle implementazioni di nuovi algoritmi; si decise pertanto di costruire ex novo un programma di simulazione, dall'organizzazione modulare, riscrivendo interamente il codice di linguaggio *Fortran 90*, ma attingendo alle *routine* più dettagliate del *Doe-2*, del *Blast* e di una versione di ricerca di quest'ultimo denominata *Iblast*. Ne è nato un programma che combina gli algoritmi più dettagliati di *Doe-2* e *Blast*, ma che si configura come un nuovo software, essendo basato sulla simulazione integrata dell'ambiente e dell'impianto di climatizzazione, a differenza dei programmi precedenti in cui l'informazione sui carichi termici determinati in ambiente veniva inviata ai componenti impiantistici in cascata.

In un simulatore come *EnergyPlus*, che integra la simulazione dell'ambiente con quella dell'impianto, invece, l'informazione relativa al carico che l'impianto è effettivamente in grado di bilanciare viene utilizzata per determinare le condizioni di temperatura dell'aria in ambiente, attraverso un processo iterativo. Inoltre, in *EnergyPlus* è possibile definire il time-step per l'analisi dell'interazione tra le zone termiche e l'ambiente esterno così come quello per l'analisi dell'interazione tra l'aria ambiente e l'impianto di climatizzazione. I due time-step possono essere differenti, rispondendo perciò alle esigenze di una modellazione maggiormente realistica dei sistemi di gestione e controllo dell'impianto.

Il programma è essenzialmente modulare, per facilitare l'inserimento di nuovi moduli, anche sviluppati in parallelo da diversi estensori, ed eventuali collegamenti ad altri applicativi. In Figura 2.5

è rappresentato uno schema delle relazioni tra i vari moduli del software *EnergyPlus*; al centro sono indicati i tre moduli principali.

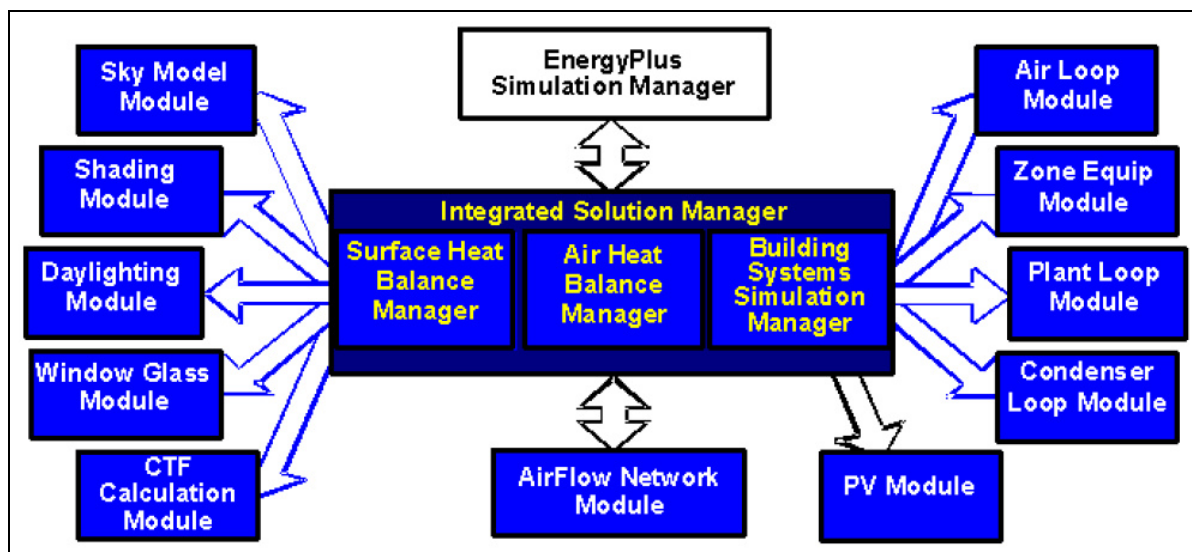


Figura 2.5 Schema delle relazioni tra i vari moduli di *EnergyPlus* (fonte: *EnergyPlus Documentation: Getting Started with EnergyPlus*, ver. 3.1.0).

Il simulatore principale del programma è composto dai seguenti tre moduli fondamentali:

- il *surface heat balance manager*, che risolve il bilancio termico in corrispondenza della superficie di ciascuna parete;
- l'*air heat balance manager*, che risolve il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi;
- il *building systems simulation manager* per la simulazione dei componenti impiantistici.

Questi tre moduli principali interagiscono con altri secondari e sono contenuti all'interno dell'*integrated solution manager*, che fa sì che i tre moduli siano risolti simultaneamente, e non in cascata, per ottenere una simulazione il più possibile realistica. Si procede secondo successive iterazioni tra la domanda di energia dell'edificio e l'offerta di energia dell'impianto di climatizzazione: alla prima iterazione si stima il carico termico dell'ambiente avendo fissato la temperatura interna pari alla temperatura di set-point; assunto questo carico termico come potenza richiesta all'impianto, viene simulato il comportamento dell'impianto di climatizzazione e viene stimata l'effettiva potenza termica che l'impianto è in grado di fornire a quell'istante temporale; con questa potenza termica viene determinata l'effettiva temperatura della zona termica, avendo approssimato la derivata temporale della temperatura dell'aria nel termine che rappresenta la variazione dell'energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine.

L'*air heat balance engine* effettua il calcolo termico relativo a ciascuna zona dell'edificio secondo il modello del bilancio termico sull'aria ambiente. Il metodo si basa sulle seguenti

assunzioni:

- temperatura dell'aria ambiente uniforme (perfetta miscelazione);
- temperatura uniforme di ciascuna superficie;
- irraggiamento uniforme sia a bassa sia ad alta lunghezza d'onda;
- superfici uniformemente diffondenti;
- trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

L'equazione di bilancio termico dell'aria può essere scritta, trascurando il flusso termico per infiltrazione e ventilazione tra zone adiacenti, come:

$$C_{ai} \cdot \frac{dT_{ai}}{d\tau} = \sum_{i=1}^N \Phi_{conv,IG} + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_{c,i} \cdot A_i \cdot (T_{si} - T_{ai}) + \dot{m} \cdot c \cdot (T_{ae} - T_{ai}) + \Phi_{syst} \quad (2.2)$$

dove, N è il numero delle sorgenti interne convettive, $\Phi_{conv,IG}$ è il flusso termico convettivo emesso dalla i -esima sorgente interna; $h_{c,i} \cdot A_i \cdot (T_{si} - T_{ai})$ è lo scambio termico convettivo dovuto alla i -esima superficie della zona termica alla temperatura T_{si} ; $\dot{m} \cdot c \cdot (T_{ae} - T_{ai})$ è lo scambio termico per ventilazione; Φ_{syst} è il carico dell'impianto. La capacità termica C_{ai} prende in considerazione la capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente.

Connesso all'*air heat balance manager* è il *surface heat balance manager* che comprende i moduli per la determinazione delle temperature superficiali (quelle della faccia interna incognite nello schema risolutivo dell'*air heat balance*) e dei flussi termici in corrispondenza delle facce interna ed esterna di ogni parete. I flussi termici scambiati attraverso i componenti di involucro sono determinati utilizzando la tecnica dei fattori di risposta, basata sul concetto di *funzione di trasferimento*, algoritmo in grado di legare la sollecitazione indotta sul sistema fisico parete con la risposta del sistema. Sono disponibili altri algoritmi per determinare il flusso per conduzione, attraverso metodi alle differenze finite, e per accoppiare il trasporto di massa di vapore alla trasmissione del calore.

Vari altri moduli interagiscono con il *surface heat balance manager*, ad esempio quelli che determinano la posizione del sole e le condizioni di radiazione solare ed illuminazione naturale, le ombre proprie e portate sui componenti d'involucro, le proprietà dei componenti trasparenti.

Il *building system simulation manager* può simulare i più diffusi componenti impiantistici ed è basato su una scomposizione dei componenti di un impianto nei seguenti sottosistemi:

- l'*air loop*, che serve a modellare le reti aerauliche (dalle unità di trattamento dell'aria ai terminali di impianto in ambiente);
- il *plant loop*, che serve a modellare le reti idroniche in riferimento a fluidi termovettori;

- il *condenser loop*, che serve a modellare le reti idroniche in riferimento ai fluidi sul lato del condensatore.

All'interno dei *plant loop* e dei *condenser loop* si distinguono ancora:

- componenti relativi alla domanda (batterie di scambio termico);
- componenti relativi all'offerta (generatori di calore e gruppi frigoriferi nel caso del *plant loop*, torri evaporative e pozzi nel caso del *condenser loop*).

Nel corso dei vari aggiornamenti cui è stato sottoposto *EnergyPlus* dal 2001, sono molti i moduli che negli anni sono stati aggregati alla struttura del programma, elaborati sia dal *team* di lavoro originario, sia da utenti che hanno sviluppato *routine* dedicate a risolvere particolari fenomeni.

2.2.2. Applicazione del software *EnergyPlus*

Il software *EnergyPlus* è utilizzato come strumento per realizzare l'analisi termica degli edifici secondo la metodologia d'indagine illustrata in precedenza. Al fine di individuare all'interno di ciascun termine del bilancio termico la quota da attribuire a ciascuna sollecitazione, secondo quanto enunciato al par. 2.1, si applica il principio di sovrapposizione degli effetti realizzando, in successione, una serie di cinque simulazioni dello stesso modello e nelle stesse condizioni di base, aggiungendo di volta in volta una sollecitazione diversa.

Nella prima simulazione si eliminano la radiazione solare e le sorgenti termiche interne, cosicché l'unica sollecitazione agente sia la temperatura esterna; tuttavia, per poter separare l'effetto della temperatura esterna sui componenti d'involucro opaco ($T_{tr,op}$) da quello sui componenti d'involucro trasparente ($T_{tr,w}$), occorre, nella fase iniziale, rendere adiabatici i serramenti, mediante l'introduzione di valori pressoché nulli di conduttività termica e di emissività termica superficiale di vetro e telaio. In questo modo è possibile ricavare l'effetto della temperatura esterna sul bilancio termico convettivo dell'aria ambiente, considerando solo la trasmissione attraverso i componenti d'involucro opaco: l'effetto sul bilancio termico è dato dal flusso termico convettivo scambiato tra l'aria interna e le superfici interne dei componenti edilizi, comprendenti l'involucro opaco, l'involucro trasparente e gli elementi edilizi interni. Il flusso termico legato alla ventilazione per effetto della temperatura esterna (T_{ve}) è ricavato direttamente.

Nella seconda simulazione si aggiunge l'effetto della temperatura esterna in riferimento ai componenti d'involucro trasparente ($T_{tr,w}$), andando a ristabilire i valori corretti dei parametri termici di vetro e telaio. In questo modo è possibile ricavare, per differenza rispetto alla prima simulazione, il contributo della temperatura esterna sul bilancio termico convettivo dell'aria ambiente, in relazione alla trasmissione di calore attraverso i componenti d'involucro trasparente, mediante l'individuazione del flusso termico convettivo scambiato tra l'aria ambiente e le superfici interne dei componenti edilizi, comprendenti l'involucro opaco, l'involucro trasparente e gli elementi

edilizi interni.

Nella terza simulazione si introducono le sorgenti interne di calore (*Int*), andando, in questo modo, ad individuare, per differenza rispetto alla seconda simulazione, l'effetto delle sorgenti interne sul bilancio termico convettivo dell'aria ambiente. La quota puramente convettiva va a costituire un carico diretto sull'aria interna; l'altra quota, invece, è costituita dal flusso convettivo scambiato dalle superfici dei componenti edilizi (d'involucro e interni) con l'aria ambiente, risultante da successivi scambi termici per irraggiamento tra le sorgenti interne di calore e le superfici interne.

Nella quarta simulazione si aggiunge il contributo della radiazione solare incidente sugli elementi d'involucro opaco (*Sol op*), ipotizzando gli elementi vetrati completamente riflettenti al fine di annullarne il contributo al carico ambiente; attraverso questa simulazione è possibile individuare, per differenza con la terza simulazione, l'effetto della radiazione solare, agente sui componenti d'involucro opaco, sul bilancio termico convettivo dell'aria ambiente, attraverso l'individuazione del flusso termico convettivo scambiato tra l'aria ambiente e le superfici interne dei componenti edilizi, rappresentati dall'involucro opaco, dall'involucro trasparente e dagli elementi edilizi interni.

Nella quinta simulazione, prendendo in considerazione anche l'ingresso della radiazione solare attraverso l'involucro trasparente (*Sol w*), si ottiene l'effetto complessivo di ciascun contributo al bilancio dell'aria interna. In particolare, isolando quest'ultimo contributo, è possibile individuare l'effetto della radiazione solare agente sui componenti d'involucro trasparente sul bilancio termico convettivo dell'aria ambiente, attraverso l'individuazione del flusso termico convettivo scambiato tra l'aria ambiente e le superfici interne dei componenti edilizi, comprendenti l'involucro opaco, l'involucro trasparente e gli elementi edilizi interni.

NUMERO SIMULAZIONE	SOLLECITAZIONI CONSIDERATE NELLA SIMULAZIONE	SOLLECITAZIONI ESCLUSE NELLA SIMULAZIONE	OPERAZIONI IN ENERGYPLUS	OUTPUT
①	TUTTE	-	-	Profilo della temperatura interna
1	T_{ve} + $T_{tr,op}$	$T_{tr,w}$ Int Sol_{op} Sol_w	- Involucro trasparente adiabatico - Assenza sorgenti termiche interne - Assenza radiazione solare	$T_{ve} \rightarrow \Phi_v$ Ricavato direttamente $T_{tr,op} \rightarrow \Phi_{conv,W} \quad \Phi_{conv,OE} \quad \Phi_{conv,OI}$
2	T_{ve} + $T_{tr,op}$ + $T_{tr,w}$	Int Sol_{op} Sol_w	- Ripristino valori involucro trasparente - Assenza di sorgenti termiche interne - Assenza di radiazione solare	$T_{tr,w} \rightarrow \Phi_{conv,W} \quad \Phi_{conv,OE} \quad \Phi_{conv,OI}$ ↓ Per differenza si ricava:
3	$T_{ve} + T_{tr,op} + T_{tr,w}$ + Int	Sol_{op} Sol_w	- Ripristino sorgenti termiche interne - Assenza di radiazione solare	$Int \rightarrow \Phi_{conv,W} \quad \Phi_{conv,OE} \quad \Phi_{conv,OI}$ ↓ Per differenza si ricava: $\Phi_{conv,IG}$ Ricavato direttamente
4	$T_{ve} + T_{tr,op} + T_{tr,w}$ + Int + Sol_{op}	Sol_w	- Presenza di radiazione solare - Involucro trasparente riflettente	↓ Per differenza si ricava: $Sol_{op} \rightarrow \Phi_{conv,W} \quad \Phi_{conv,OE} \quad \Phi_{conv,OI}$
5	$T_{ve} + T_{tr,op} + T_{tr,w}$ + $Int + Sol_{op}$ + Sol_w	-	- Ripristino valori involucro trasparente	↓ Per differenza si ricava: $Sol_w \rightarrow \Phi_{conv,W} \quad \Phi_{conv,OE} \quad \Phi_{conv,OI}$

Figura 2.6 Rappresentazione schematica della serie di simulazioni numeriche in *EnergyPlus*.

Affinché sia garantita la coerenza tra i risultati, le varie simulazioni devono essere necessariamente effettuate nelle medesime condizioni di temperatura interna. A tal fine, occorre procedere all'individuazione preliminare dei valori orari della temperatura dell'aria interna, effettuando una simulazione numerica con una temperatura di regolazione dell'impianto di climatizzazione massima di 26 °C e minima di 20 °C e considerando tutte le sollecitazioni termiche. Il profilo dei valori orari di temperatura interna ricavati da questa simulazione numerica costituiscono il dato da inserire in ingresso nelle cinque simulazioni come nuove temperature prefissate.

In Figura 2.6 è rappresentato il percorso descritto in forma schematica.

2.3. L'applicazione della modalità di analisi termica

La metodologia di indagine è corredata da una specifica modalità di rappresentazione dei risultati in uscita dalle simulazioni numeriche, attraverso la quale è possibile evidenziare e confrontare i pesi delle diverse sollecitazioni/termini del bilancio termico sul fabbisogno di energia e sui carichi termici o frigoriferi dell'edificio.

Per poter illustrare la nuova modalità di rappresentazione ci si avvale di un caso studio esemplificativo. Le assunzioni di calcolo dell'edificio in esame vengono presentate solo per fornire la necessaria completezza delle informazioni richieste per l'analisi; tuttavia il caso studio è, in questa sede, solo un mezzo per esplicitare la modalità di rappresentazione dei risultati dell'analisi termica, utile per tutte le possibili applicazioni del metodo presentate in seguito.

2.3.1. Un esempio di applicazione

Oggetto di studio è l'ultimo piano di un edificio ad uso residenziale in progetto nella città di Torino (cfr. Figura 2.7). Il piano è costituito da due unità immobiliari identiche separate dal vano scala centrale, supposto non climatizzato (cfr. Figura 2.8). L'edificio ha esposizione principale nord-sud, essendo le due testate est-ovest costruite in aderenza agli edifici vicini, a meno di una parte della facciata est che confina con l'ambiente esterno, poiché l'edificio confinante presenta un'altezza inferiore. Il pavimento separa le unità immobiliari del piano in esame da quelle del piano sottostante, climatizzate alla stessa temperatura; la copertura è piana. Il contesto esterno edificato, oltre gli edifici adiacenti, è costituito da un unico edificio fronteggiante la facciata nord del piano in esame.

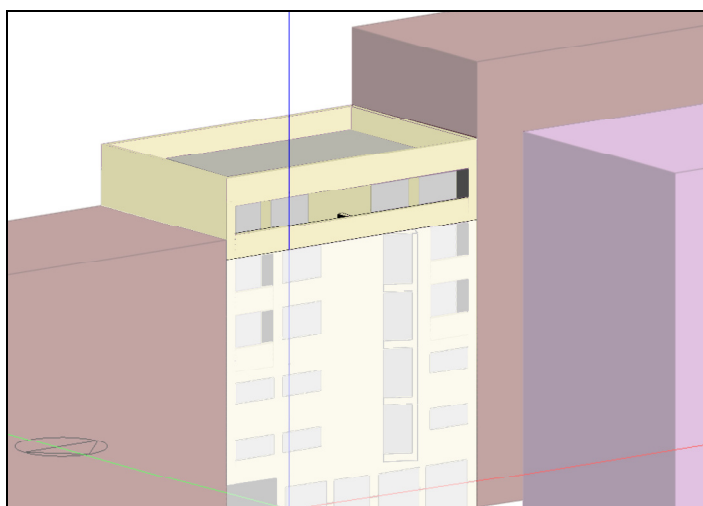


Figura 2.7 Edificio oggetto di studio (oggetto dell'analisi è l'ultimo piano). La modellazione geometrica dell'edificio è stata realizzata con il software *DesignBuilder*.

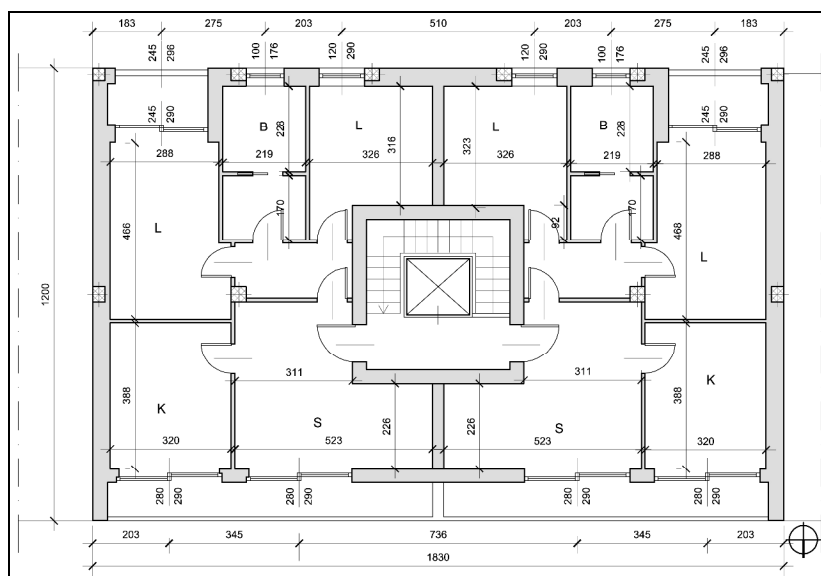


Figura 2.8 Pianta del piano oggetto di studio.

In Tabella 2.2 sono riportati i principali dati tipologico-dimensionali e costruttivi del caso studio. I valori di trasmittanza termica degli elementi d'involucro rispettano i requisiti minimi imposti dal D. Lgs. n. 311/2006 all. C.

Tabella 2.2 Principali dati tipologici e costruttivi del caso studio.

DATI TIPOLOGICO-DIMENSIONALI					
A_f [m ²]	171,9	V_n [m ³]	575,9	A_w/A_{env}	0,14
A_w [m ²]	57,20	V_g [m ³]	638,7	A_w/A_f	0,33
A_{env} [m ²]	396,0	A_{env}/V_g [m ⁻¹]	0,62	A_{env}/A_f	2,30
DATI COSTRUTTIVI					
ELEMENTI EDILIZI	U [W/(m ² K)]	s [m]	s_{ins}/s_{ms} ^(*)		
Chiusura orizzontale superiore	0,32	0,46	0,28		
Partizioni orizzontali	0,74	0,38	0,08		
Chiusure verticali opache	0,37	0,32	0,33		
Partizioni verticali	0,79	0,21	0,17		
Chiusure verticali trasparenti (assenza di schermature; vetro triplo basso-emissivo, $g = 0,58$)	1,82	-	-		
^(*) Il materiale isolante (<i>ins</i>) è lana di roccia, avente massa volumica pari a 60 kg/m ³ (nelle pareti) e 150 kg/m ³ (nei solai). Per “strato massivo” (<i>ms</i>) si intende un materiale con massa volumica di 1800-2000 kg/m ³					

Per quanto riguarda le modalità di utilizzo della residenza in esame, alcuni dati d'ingresso, in particolare quelli relativi alla ventilazione naturale ed agli apporti interni, con i relativi profili di occupazione, sono ricavati dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-1 e dalla norma tecnica UNI EN ISO 13790, le quali, pur riferendosi ad un modello di calcolo semplificato della prestazione energetica degli edifici, forniscono valori convenzionali d'uso a cui riferirsi nelle valutazioni energetiche. Le assunzioni del calcolo sono le seguenti:

- tasso di ventilazione pari a 0,3 ricambi orari;

- apporti termici interni globali pari a 12 W/m^2 , per metà di tipo convettivo e per metà di tipo radiativo, nelle condizioni di massimo utilizzo e variabili in funzione del profilo di occupazione, come indicato in Figura 2.9;

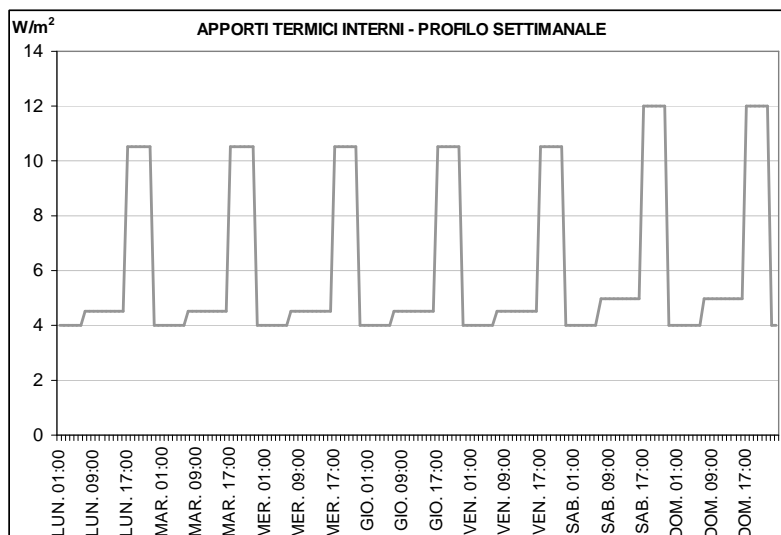


Figura 2.9 Profilo settimanale degli apporti termici interni: valori convenzionali per edifici residenziali, ricavati da UNI/TS 11300-1 e UNI EN ISO 13790.

- gestione dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento continua sulle 24 ore;
- temperatura minima di regolazione pari a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- temperatura massima di regolazione pari a $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Il piano in esame è modellato come un'unica zona termica.

Con il codice di simulazione numerica dettagliata *EnergyPlus* è effettuata una prima simulazione considerando tutte le sollecitazioni termiche. I valori orari di temperatura interna ricavati da questa prima simulazione sono inseriti come nuove temperature prefissate – attraverso la scelta di un termostato a set-point fisso – all'interno delle successive simulazioni nelle quali, di volta in volta, è considerata una diversa sollecitazione (secondo la procedura descritta al par. 2.2.2). L'analisi è effettuata per il mese di luglio.

2.3.2. La rappresentazione dei termini del bilancio energetico

Si riportano di seguito i tipi di rappresentazione dei risultati, in uscita dalle simulazioni numeriche, che meglio descrivono la metodologia di analisi termica proposta.

Rappresentazione disaggregata dei valori medi

Nella prima tipologia di rappresentazione sono riportati i valori medi del mese di luglio dei termini dell'equazione di bilancio termico convettivo sull'aria interna, espressi in potenza termica per

unità di pavimento climatizzato (Figura 2.10). I termini del bilancio sono espressi in funzione delle varie sollecitazioni termiche dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno. L'insieme dei termini del bilancio imputati alla medesima sollecitazione termica (facilmente individuabili nel grafico perché dello stesso colore) è l'output di una specifica simulazione, tra tutte quelle sviluppate in successione, nella quale è preso in considerazione unicamente l'effetto di quella data sollecitazione.

Andando ad analizzare il grafico di Figura 2.10, i primi tre termini rappresentati sono i flussi termici scambiati per convezione con l'aria interna dalle superfici opache esterne (*Conv. OE*), dalle superfici vetrate (*Conv. W*) e dalle superfici opache e/o trasparenti interne (*Conv. OI*). Il flusso termico convettivo è legato in parte alla temperatura esterna, che determina lo scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro opaco ($T_{tr,op}$) e l'involucro trasparente ($T_{tr,w}$); la temperatura esterna, essendo mediamente più bassa rispetto alla temperatura interna, provoca, in entrambi i casi, una dispersione di calore (scambio termico negativo). Un'altra quota del flusso termico convettivo sulle superfici è da ascrivere alla radiazione solare (*Sol w*) che colpisce gli elementi vetrati, entra in ambiente e incide sulle superfici interne degli elementi interni e dei componenti d'involucro. Un'altra causa dello scambio termico convettivo è la radiazione solare che incide sui componenti opachi dell'involucro, parzialmente assorbita e trasmessa attraverso gli elementi opachi dell'involucro edilizio (*Sol op*), scambiata tra le superfici interne per irraggiamento termico, e da qui, per convezione, ceduta all'aria interna. Una quarta sollecitazione è rappresentata dalle sorgenti di calore interne (*Int*) che cedono parte del calore per irraggiamento alle superfici interne, che a loro volta lo cedono all'aria interna per convezione. Il quarto termine in Figura 2.10 rappresenta la potenza termica convettiva sull'aria interna (*Conv. IG*) prodotta dalle sorgenti di calore interne (*Int*); il quinto termine rappresenta invece la potenza termica legata alla ventilazione (*V*), dipendente unicamente dalla temperatura esterna (T_{ve}).

A partire da questa rappresentazione, è possibile confrontare i pesi di ogni termine del bilancio/sollecitazione termica sul carico frigorifero dell'edificio. Ad esempio, analizzando i risultati riportati in Figura 2.10 per il caso studio in esame, si può notare come, tra tutti i contributi al bilancio di energia, quello che influenza maggiormente il carico di raffrescamento sia lo scambio termico convettivo delle superfici interne riscaldate a seguito dell'assorbimento della radiazione solare che entra attraverso i componenti trasparenti dell'involucro edilizio. Occorre osservare che la rilevanza di tale termine del carico termico è anche legata alla grande estensione di questi elementi rispetto ai componenti opachi dell'involucro edilizio. Per questi ultimi, invece, il contributo di segno positivo al bilancio è determinato, in porzioni quasi uguali, sia dalla radiazione solare entrante attraverso le vetrate, sia dalla radiazione solare assorbita dalle pareti opache, sia dalle sorgenti interne di calore. I termini negativi sono attribuiti all'effetto della temperatura esterna, che è mediamente inferiore rispetto alla temperatura interna.

La somma dei contributi al bilancio caratterizzati dal segno positivo e di quelli caratterizzati,

invece, dal segno negativo è riportata all'interno del riquadro in alto a destra nella rappresentazione di Figura 2.10; nello stesso riquadro è indicato il carico netto di raffrescamento medio mensile e le ore di raffrescamento nel mese di luglio rispetto al totale delle ore del mese.

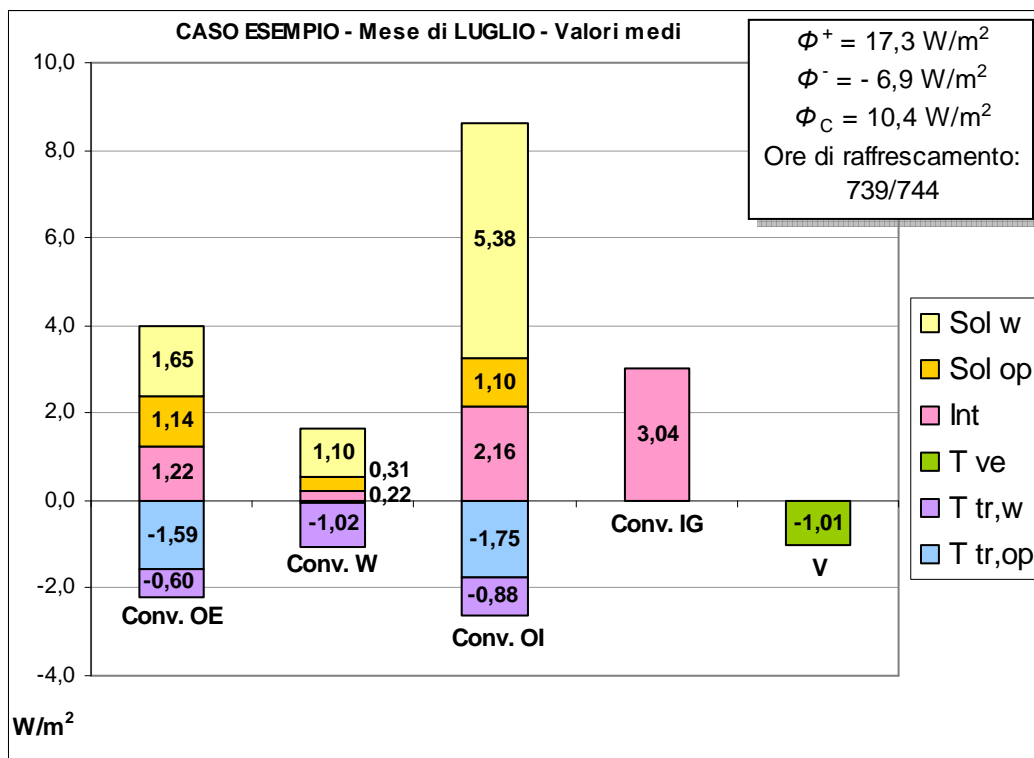


Figura 2.10 Esempio di rappresentazione della metodologia d'analisi termica. Valore medio mensile (luglio) dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni termiche, espressi in termini di potenza termica media per unità di pavimento climatizzato, in riferimento al caso studio in esame.

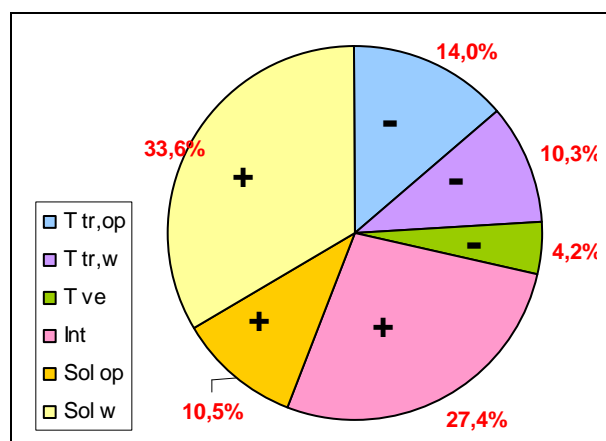


Figura 2.11 Esempio di rappresentazione della metodologia d'analisi termica. Peso, espresso in percentuale, del contributo di ciascuna sollecitazione (positiva o negativa) sul fabbisogno di energia per il raffrescamento dell'edificio nel mese di luglio, in riferimento al caso studio in esame.

Per meglio determinare l'influenza di ogni singola sollecitazione sulla prestazione termica dell'edificio si fa ricorso ad un'altra tipologia di rappresentazione, quella riportata in Figura 2.11,

sempre in riferimento al mese di luglio e per il caso studio in esame. Il grafico è ottenuto sommando separatamente i contributi delle singole sollecitazioni rappresentate in Figura 2.10.

Rappresentazione disaggregata degli scarti quadratici medi

Un'altra tipologia di rappresentazione è presentata in Figura 2.12, dove sono riportati gli scarti quadratici medi delle stesse grandezze già visualizzate in Figura 2.10. La rappresentazione della deviazione standard fornisce un'informazione aggiuntiva a quella dei valori medi; poiché lo scarto quadratico medio dipende sia dall'entità della capacità termica sia dalla variabilità delle sollecitazioni termiche, questo tipo di rappresentazione si pone quale utile strumento per individuare le criticità e le conseguenti soluzioni da adottare per migliorare la prestazione termica degli edifici in condizioni dinamiche. In riferimento alla prestazione termica estiva, occorre limitare le variazioni di carico frigorifero allo scopo di ridurne i picchi: la rappresentazione permette di verificare l'efficacia di una strategia basata sull'aumento dell'inerzia termica nel retrofit dell'edificio.

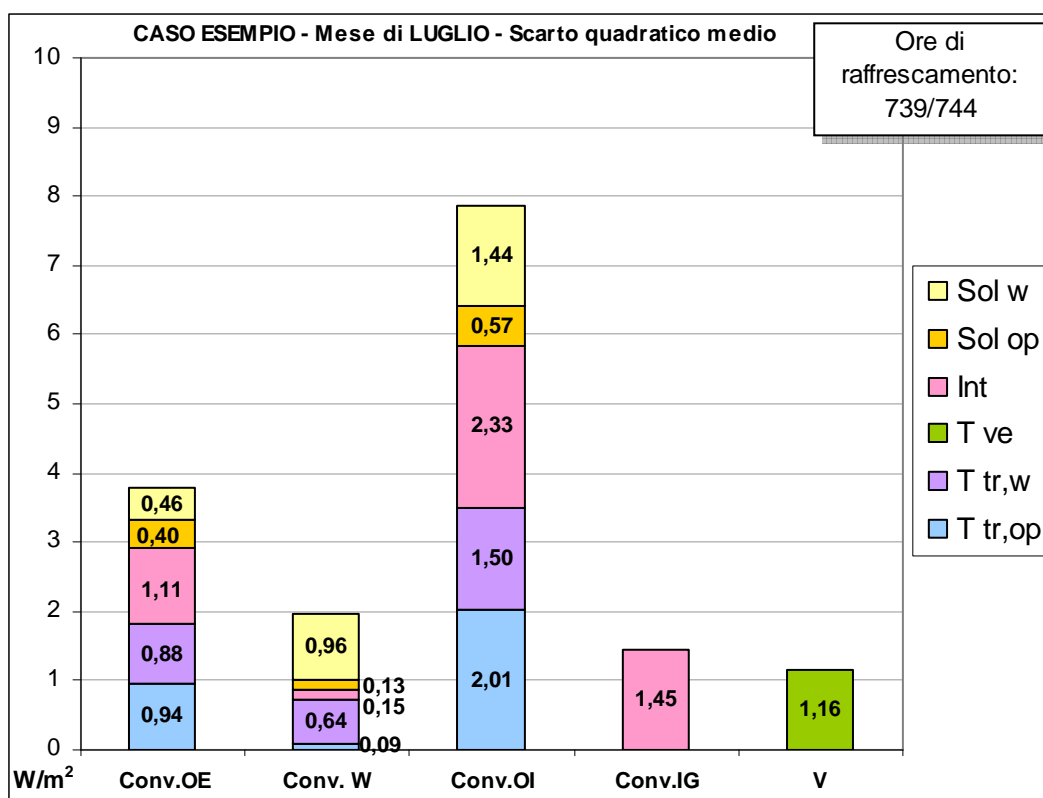


Figura 2.12 Esempio di rappresentazione della metodologia d'analisi termica. Scarto quadratico medio (luglio) dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni termiche, espressi in termini di potenza termica media per unità di pavimento climatizzato, in riferimento al caso studio in esame.

Nel caso studio in esame (cfr. Figura 2.12), ad esempio, la deviazione maggiore dal valore medio è da ascrivere alla quota convettiva sulle superfici interne, per effetto, in primo luogo, delle sorgenti interne di calore e, in secondo luogo, della variazione della temperatura esterna. Ciò è

dovuto principalmente alla non stazionarietà delle sollecitazioni ed alle caratteristiche dei componenti edilizi interni che, essendo poco massivi, non sono in grado di smorzare efficacemente l'effetto delle sollecitazioni termiche dinamiche.

Rappresentazione accorpata dei termini

Un'ulteriore rappresentazione della nuova modalità di analisi termica è illustrata in Figura 2.13. Questa rappresentazione, rispetto alle precedenti, permette di accorpare differentemente i termini del bilancio; il grafico è ottenuto separando i termini del bilancio che sono influenzati dagli elementi d'involucro ($T_{tr,op}$, $T_{tr,w}$, Sol_{op} , Sol_w) dai termini che non sono influenzati dall'involucro (Int , V). L'operazione si effettua a partire dal grafico della Figura 2.10, sommando i vari termini in modo da confrontare il contributo dell'involucro e il contributo dei fattori slegati dall'involucro sul fabbisogno energetico dell'edificio o sul suo carico frigorifero. Questo passaggio permette di rispondere alla domanda posta nel primo livello del procedimento d'analisi, ovvero quale sia l'importanza del progetto dell'involucro edilizio nella definizione della prestazione energetica dell'edificio (cfr. par. 2.1, Figura 2.2). In Figura 2.13 il contributo è indicato sia nel suo valore medio sia nella sua deviazione standard.

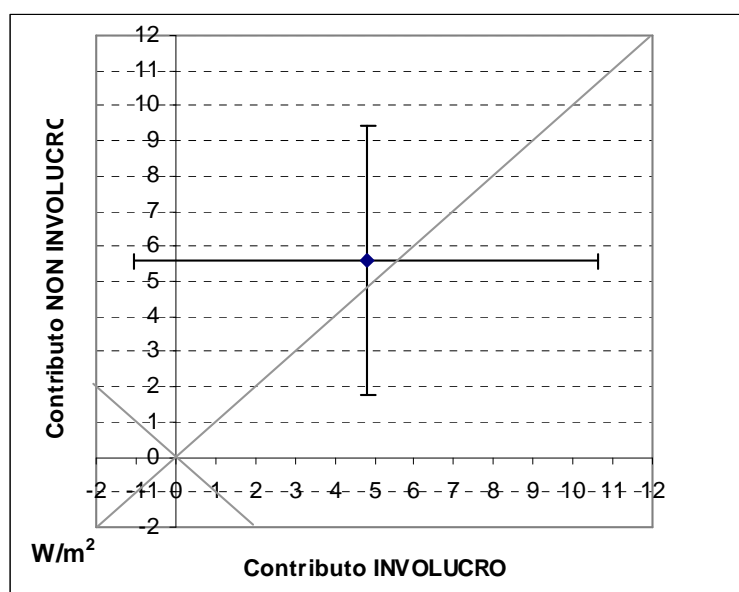


Figura 2.13 Esempio di rappresentazione della metodologia d'analisi termica. Relazione tra il contributo dei termini del bilancio termico convettivo legati all'involucro e il contributo dei termini del bilancio termico convettivo non legati all'involucro, sulla prestazione termica dell'edificio nel mese di luglio (riferimento al caso studio in esame).

Nel caso studio in esame e secondo il grafico in Figura 2.13, l'involucro non influenza la prestazione energetica estiva media mensile (luglio) tanto quanto gli aspetti che non sono legati all'involucro (es. le sorgenti termiche interne); tuttavia, andando ad osservare anche lo scarto

quadratico medio, si può notare la maggior variabilità del contributo dell'involucro sulla prestazione termica estiva dell'edificio rispetto alla variabilità del contributo delle sorgenti termiche interne e della ventilazione. Da ciò si deduce che l'involucro, rispetto alle sorgenti interne di calore, assumerebbe talvolta un peso maggiore sul carico frigorifero dell'edificio se si considerasse il valore istantaneo invece del valore medio del suo contributo.

Un'analoga rappresentazione è quella riportata in Figura 2.14. Questo grafico, rispetto al precedente, permette di individuare il contributo dell'involucro opaco e il contributo dell'involucro trasparente sul fabbisogno energetico dell'edificio o sul carico frigorifero dell'edificio. Il grafico è ottenuto a partire dalla rappresentazione della Figura 2.10, in cui si sommano, da un lato i valori dei termini del bilancio riferiti alle sollecitazioni che si relazionano con l'involucro edilizio opaco ($T_{tr,op}$, Sol_{op}), dall'altro i valori riferiti alle sollecitazioni che si relazionano con l'involucro edilizio trasparente ($T_{tr,w}$, Sol_w). Questo passaggio permette di rispondere alla domanda posta nel secondo livello del procedimento d'analisi, ovvero quale sia l'importanza dell'involucro edilizio opaco nella definizione della prestazione energetica dell'edificio (cfr. par. 2.1, Figura 2.3).

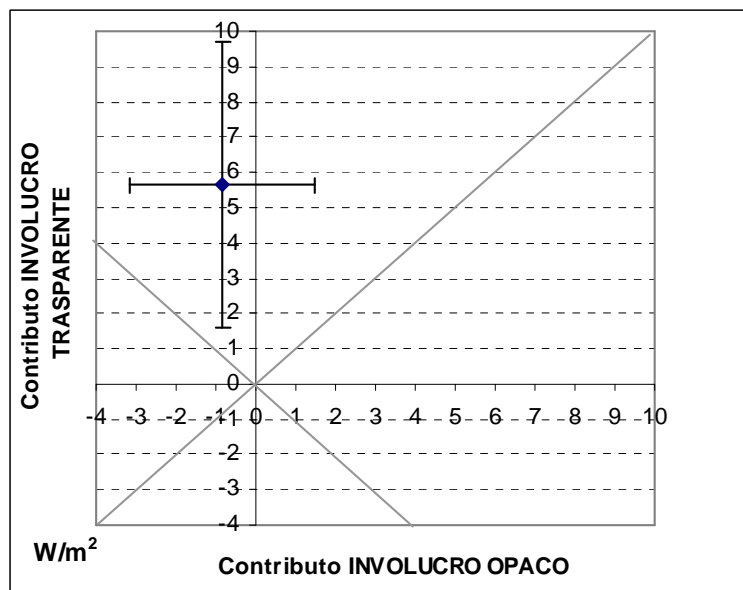


Figura 2.14 Esempio di rappresentazione della metodologia d'analisi termica. Relazione tra il contributo dei termini del bilancio termico convettivo legati all'involucro opaco e il contributo dei termini del bilancio termico convettivo legati all'involucro trasparente sulla prestazione termica dell'edificio nel mese di luglio (riferimento al caso studio in esame).

Nel caso studio in esame e secondo il grafico in Figura 2.14, la prestazione energetica estiva (mese di luglio) è maggiormente influenzata, in valor medio, dall'involucro trasparente rispetto all'involucro opaco; anche la deviazione standard del contributo dell'involucro trasparente risulta maggiore di quella relativa all'involucro opaco. Da questa osservazione si deduce che l'involucro trasparente, rispetto all'involucro opaco, assume un peso maggiore sul carico frigorifero dell'edificio,

sia in termini istantanei sia in valore medio.

2.3.3. Possibili impieghi del metodo nella diagnosi energetica degli edifici

La nuova modalità di analisi termica degli edifici è caratterizzata da molteplici applicazioni, prime fra tutte la progettazione termo-fisica degli edifici e la diagnosi energetica. Il metodo, infatti, permette l'individuazione di "criticità" e l'applicazione di strategie per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici.

Un esempio dell'impiego del metodo per la diagnosi energetica e l'ottimizzazione del progetto termico degli edifici viene realizzato sul caso studio del paragrafo precedente. Dall'analisi del grafico riportato in Figura 2.10 emerge l'esistenza di un elevato contributo al carico frigorifero da parte della radiazione solare entrante attraverso i componenti trasparenti dell'involucro edilizio del piano oggetto di studio.

Per limitare questa "criticità", al fine di ridurre il fabbisogno frigorifero, si prende in considerazione la possibilità di effettuare una "variante progettuale" al caso base, consistente nell'introduzione di dispositivi di schermatura solare sulle finestre, che intercettino direttamente la radiazione solare e ne riducano l'ingresso in ambiente. In tal modo si opera una variazione rispetto al caso base modificando le proprietà termiche e solari dei componenti trasparenti. Occorre sottolineare che parte dei serramenti della zona termica analizzata era già schermata da elementi ombreggianti esterni fissi, quali aggetti orizzontali e verticali e, per una esposizione, anche da un edificio posto frontalmente. La Figura 2.15 illustra il profilo orario dell'irradianza solare nel mese di luglio sulle superfici trasparenti esterne della zona termica in esame, in presenza di ostacoli esterni fissi. Dovendo installare sistemi di schermatura solare mobili soprattutto a sud, si opta per dispositivi a lamelle orizzontali da considerarsi in funzione nelle ore in cui la radiazione solare sulle superfici trasparenti supera i 100 W/m^2 , secondo il tratteggio indicato in Figura 2.15. L'attivazione delle schermature consentirebbe, in questo modo, di bloccare gran parte della radiazione solare globale a sud e una quota di radiazione solare, riflessa e diffusa, a nord. Tuttavia, la scelta del set-point di attivazione delle schermature è, in quest'analisi, del tutto esemplificativa.

Si effettua quindi una nuova serie di simulazioni in successione, utilizzando il procedimento descritto al par. 2.2.2, allo scopo di separare le diverse sollecitazioni sui termini del bilancio termico anche in questa condizione.

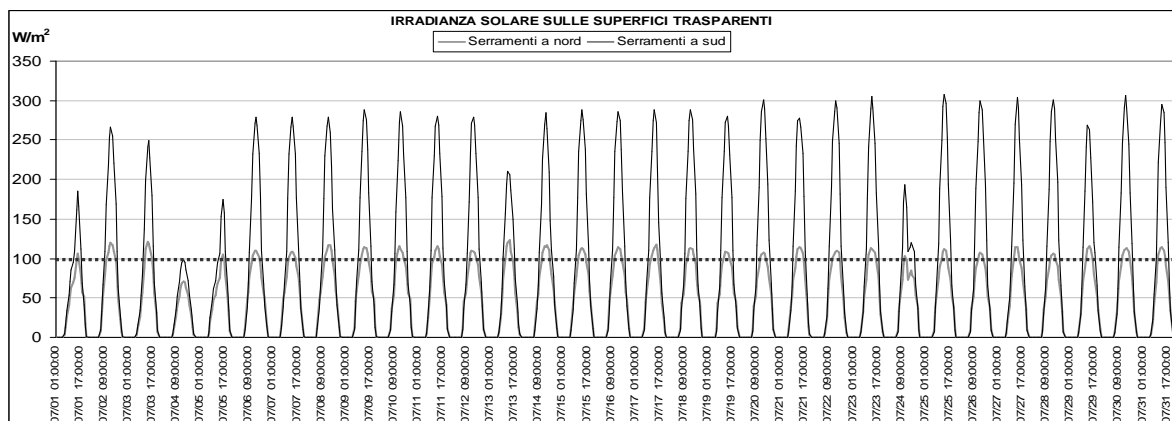


Figura 2.15 Profilo orario nel mese di luglio dell'irradianza solare sull'involucro trasparente della residenza in esame e indicazione del livello oltre il quale è prevista l'attivazione delle schermature solari mobili.

In Figura 2.16 si riportano i risultati del caso studio nella situazione in cui sia prevista l'attivazione di schermature solari, confrontato con lo stesso edificio nella situazione originaria. I valori si riferiscono alla media del mese di luglio dei termini del bilancio termico convettivo dell'aria interna, espressi in potenza termica per unità di pavimento climatizzato. Rispetto al caso base senza schermature, il fabbisogno netto di energia termica per il raffrescamento si riduce del 55%, conseguentemente ad una limitazione media degli apporti solari in ambiente attraverso le superfici trasparenti del 47%; parallelamente, le ore di raffrescamento nel mese di luglio variano da 739 a 698.

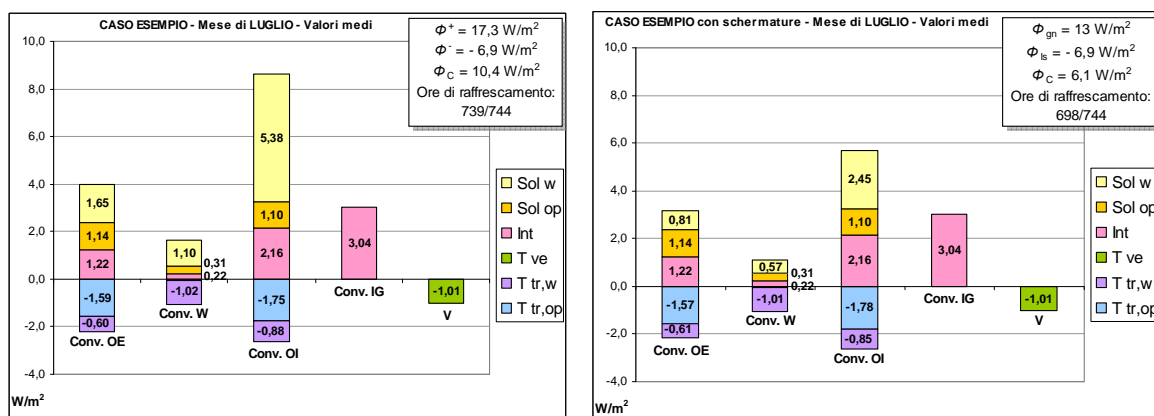


Figura 2.16 Valore medio mensile (luglio) dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni termiche; confronto tra il caso studio nella situazione originaria e con la presenza di schermature solari.

Questo esempio dimostra come la metodologia di indagine, con la sua particolare modalità di rappresentazione dei risultati, permetta di individuare criticità nel progetto termico di un edificio e di quantificare l'effetto di soluzioni migliorative.

2.4. L'utilizzo della metodologia d'indagine per il confronto di modelli di calcolo

Nel presente paragrafo viene illustrata un'altra possibile applicazione della metodologia di indagine, impiegata per realizzare il confronto tra i principali modelli per il calcolo delle prestazioni termiche degli edifici, un metodo semplificato in regime quasi-stazionario e un metodo dettagliato in regime dinamico. L'applicazione dei due metodi, consistenti rispettivamente nell'applicazione della normativa tecnica (UNI/TS 11300) e di un codice di simulazione numerica (*EnergyPlus*), ad un caso studio, permette di confrontare le assunzioni di calcolo e i risultati.

Le principali caratteristiche del codice di simulazione numerica *EnergyPlus* sono riportate nel par. 2.2.1. Qui di seguito è invece presentato il metodo di calcolo semplificato UNI/TS 11300.

2.4.1. Il metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario (UNI/TS 11300)

Un requisito essenziale per l'adozione delle misure previste dalla Direttiva Europea 2002/91/CE (EPBD) è l'esistenza di uno schema generale che definisca la metodologia di calcolo della prestazione energetica globale degli edifici. A tal fine la Commissione Europea ha dato mandato al CEN (ente normatore europeo) perché mettesse a punto, tra l'altro, una metodologia di calcolo condivisa. La normativa europea di recente pubblicazione comprende oltre 40 norme tecniche, pubblicate nel 2007 dal CEN e recepite nel 2008 dall'UNI in lingua inglese.

Nella sua complessa struttura, la normativa europea descrive diversi metodi di calcolo alternativi e definisce, per ciascun metodo, una serie di valori di default dei parametri di calcolo. Ai singoli paesi si consente di scegliere il metodo ritenuto più adatto e di definire su base nazionale i valori di alcuni parametri, per meglio adattare l'applicazione del metodo alle condizioni climatiche e alle tipologie costruttive ed impiantistiche locali. Tutto ciò ha indotto l'UNI e il CTI a mettere a punto una serie di norme nazionali, finalizzate all'applicazione delle norme europee in Italia, con particolare riferimento alle procedure di verifica e valutazione previste dalla legislazione energetica nazionale.

La recente normativa tecnica nazionale sul calcolo della prestazione energetica degli edifici è rappresentata dalla UNI/TS 11300, ovvero una serie di quattro specifiche tecniche adottate dalla legislazione nazionale per l'applicazione della Direttiva Europea 2002/91/CE. La serie UNI/TS 11300 si applica, attraverso il D.P.R. n. 59/2009, per la verifica dei requisiti minimi di prestazione energetica fissati dal D. Lgs. n. 192/2005, successivamente modificato e integrato dal D. Lgs. n. 311/2006, e per l'analisi energetica finalizzata alla certificazione energetica degli edifici, secondo quanto stabilito dal D.M. 26 giugno 2009 contenente le Linee Guida Nazionali per la certificazione. Il pacchetto normativo UNI/TS 11300 è così composto:

- parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale (UNI/TS 11300-1; maggio 2008);
- parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria (UNI/TS 11300-2; maggio 2008);
- parte 3: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva (UNI/TS 11300-3; marzo 2010);
- parte 4: utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione di acqua calda sanitaria (non ancora pubblicata).

In Figura 2.17 è riportato uno schema che illustra i collegamenti tra la normativa tecnica europea e la normativa tecnica italiana sul calcolo della prestazione termica degli edifici. La direzione del calcolo per la determinazione del fabbisogno di energia primaria è opposta rispetto a quella del flusso di energia: il calcolo, infatti, prende avvio dal fabbisogno netto di energia dell'edificio, calcolato con la UNI/TS 11300-1, e procede a ritroso fino alla determinazione dell'energia primaria.

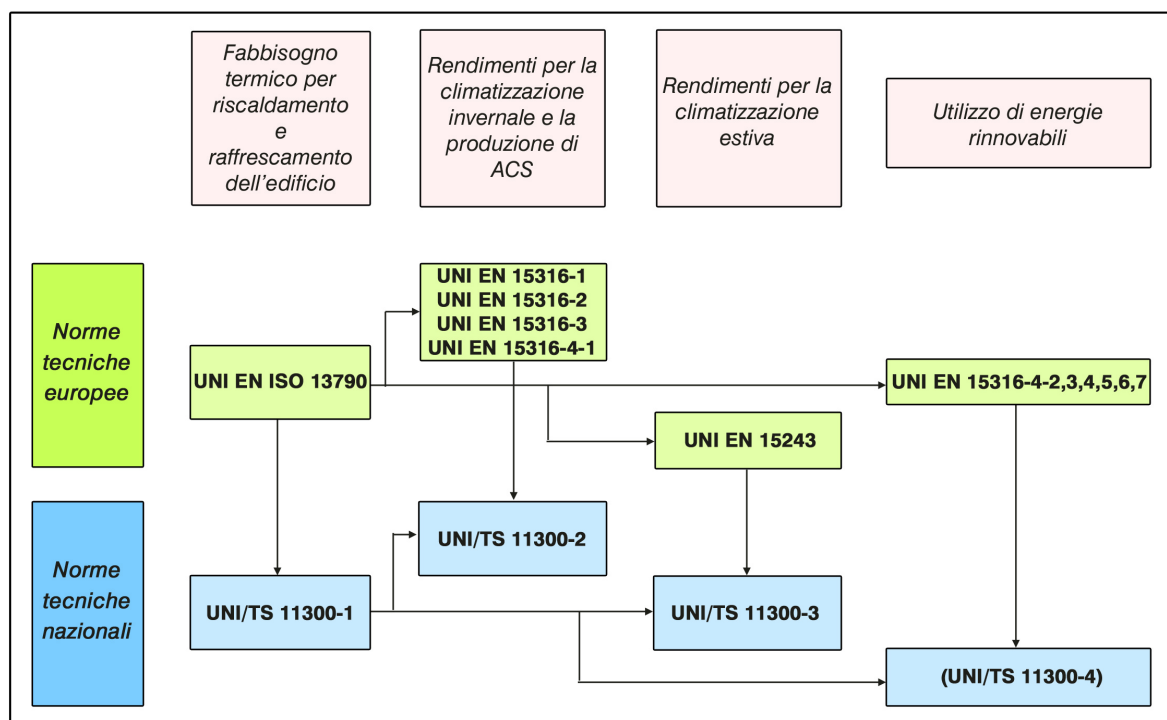


Figura 2.17 Relazione tra la normativa tecnica europea e quella italiana per il calcolo del fabbisogno di energia per la climatizzazione degli edifici.

La specifica tecnica UNI/TS 11300 propone un metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario. La procedura di calcolo prevede le seguenti fasi:

- 1) definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio;
- 2) se richiesta, definizione dei confini delle diverse zone di calcolo;
- 3) definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
- 4) calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni netti di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e il raffrescamento ($Q_{C,nd}$);
- 5) calcolo dei rendimenti impiantistici e dei fabbisogni di energia primaria (Q_p);
- 6) aggregazione dei risultati relativi alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

La parte prima della serie UNI/TS 11300 definisce le linee guida per l'applicazione nazionale della norma UNI EN ISO 13790:2008, con riferimento al metodo mensile quasi-stazionario per il calcolo dei fabbisogni netti di energia per riscaldamento e per raffrescamento; il modello di calcolo è basato sul bilancio tra dispersioni termiche (trasmissione e ventilazione) e guadagni termici (solari e interni), valutati in condizioni medie mensili. Gli effetti dinamici sui fabbisogni netti di energia sono tenuti in conto attraverso l'introduzione dei seguenti parametri dinamici:

- un fattore di utilizzazione che tiene conto della non corrispondenza temporale tra scambi termici (per trasmissione e ventilazione) e apporti termici (solari e interni);
- una correzione della temperatura di regolazione per tenere conto dell'intermittenza o dell'attenuazione del riscaldamento/raffrescamento.

I suddetti parametri dipendono dall'inerzia termica dell'edificio, dal rapporto tra apporti termici e dispersioni e dai profili orari di occupazione e gestione dell'impianto.

I fabbisogni netti di energia per riscaldamento e raffrescamento (UNI/TS 11300-1) si calcolano, per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, come:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (2.3)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (2.4)$$

dove, $Q_{H/C,nd}$ è il fabbisogno netto di energia dell'edificio per riscaldamento/raffrescamento; $Q_{H/C,ht}$ è lo scambio termico totale nel caso di riscaldamento/raffrescamento; $Q_{H/C,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento/raffrescamento; $Q_{H/C,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento/raffrescamento; Q_{gn} sono gli apporti termici totali; Q_{int} sono gli apporti termici interni; Q_{sol} sono gli apporti termici solari; $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti termici; $\eta_{C,ls}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Gli scambi termici si calcolano con le seguenti equazioni:

$$Q_{H/C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H/C} - \theta_e) \cdot t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \cdot \Phi_{r,mn,k} \right\} \cdot t \quad (2.5)$$

$$Q_{H/C,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H/C} - \theta_e) \cdot t \quad (2.6)$$

dove, $H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno; $H_{ve,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno; $\theta_{int,set,H/C}$ è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento/raffrescamento della zona considerata; θ_e è la temperatura media mensile dell'ambiente esterno; $F_{r,k}$ è il fattore di forma tra il componente edilizio k -esimo e la volta celeste; $\Phi_{r,mn,k}$ è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio k -esimo, mediato sul tempo; t è la durata del mese considerato.

Gli apporti termici si calcolano con le seguenti equazioni:

$$Q_{int} = \left\{ \sum_k \Phi_{int,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{int,mn,u,l} \right\} \cdot t \quad (2.7)$$

$$Q_{sol} = \left\{ \sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{sol,mn,u,l} \right\} \cdot t \quad (2.8)$$

dove, le due sommatorie si riferiscono rispettivamente ai flussi, tutti mediati sul tempo, entranti e/o generati nella zona climatizzata e negli ambienti non climatizzati; $b_{tr,l}$ è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna l -esima oppure il flusso termico l -esimo di origine solare; $\Phi_{int,mn,k}$ è il flusso termico prodotto dalla k -esima sorgente di calore interna; $\Phi_{int,mn,u,l}$ è il flusso termico prodotto dalla l -esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente u ; $\Phi_{sol,mn,k}$ è il flusso termico di origine solare nell'ambiente climatizzato attraverso la k -esima superficie d'involucro; $\Phi_{sol,mn,u,l}$ è il flusso termico l -esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u .

La UNI/TS 11300-1 rimanda a norme tecniche di supporto per la determinazione dei dati richiesti all'interno delle formulazioni che esplicitano l'equazione principale di bilancio energetico.

La parte seconda della serie UNI/TS 11300 fornisce dati e metodi per la determinazione del fabbisogno di energia utile per la preparazione dell'acqua calda sanitaria, delle perdite e dei fabbisogni di energia elettrica dei sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, del fabbisogno annuo specifico di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienico sanitari, del rendimento globale medio stagionale.

L'approccio metodologico della UNI/TS 11300-2 prevede di calcolare su base mensile e per ciascun sottosistema costituente l'impianto termico, il fabbisogno di energia in ingresso al

sottosistema, l'energia ausiliaria richiesta e le perdite totali al netto di quelle recuperate, sulla base dell'energia utile che il sottosistema deve fornire in uscita e delle sue caratteristiche e condizioni di funzionamento, che ne influenzano l'efficienza.

La UNI/TS 11300-2 considera la possibilità dedurre dal fabbisogno utile ideale di energia termica dell'edificio in regime di riscaldamento le perdite di energia recuperate dal sistema di produzione di acqua calda sanitaria, ricavando in questo modo il fabbisogno utile dell'edificio al netto dei recuperi. Il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento dell'edificio (UNI/TS 11300-2) può essere ottenuto come:

$$Q_{p,H} = (Q_{H,nd} - Q_{HW,lrh} + Q_{l,H,e} + Q_{l,H,rg} + Q_{l,H,d} + Q_{l,H,s} + Q_{l,H,gn}) \cdot f_{p,i} + W_{H,aux} \cdot f_{p,el} \quad (2.9)$$

dove, per ogni mese della stagione di riscaldamento: $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno ideale per il riscaldamento; $Q_{HW,lrh}$ sono le perdite recuperate dal sistema di acqua calda sanitaria; $Q_{l,H,e}$ sono le perdite di energia del sottosistema di emissione; $Q_{l,H,rg}$ sono le perdite di energia del sottosistema di regolazione; $Q_{l,H,d}$ sono le perdite di energia del sottosistema di distribuzione; $Q_{l,H,s}$ sono le perdite di energia del sottosistema di accumulo; $Q_{l,H,gn}$ sono le perdite di energia del sottosistema di generazione; $f_{p,i}$ è il fattore di conversione in energia primaria del vettore energetico i ; $W_{H,aux}$ è l'energia elettrica per il funzionamento degli ausiliari; $f_{p,el}$ è il fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria.

La parte terza della serie UNI/TS 11300 fornisce dati e metodi per la determinazione dei rendimenti e dei fabbisogni di energia dei sottosistemi degli impianti di climatizzazione estiva e dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione estiva. La specifica tecnica si applica ad impianti fissi di climatizzazione estiva con macchine frigorifere azionate elettricamente o ad assorbimento.

L'energia primaria richiesta la climatizzazione estiva (UNI/TS 11300-3) si esprime come:

$$Q_{p,C} = W_{aux} \cdot f_{p,el} + \left[\sum_x \frac{Q_{Cr,x} + Q_{v,x}}{\eta_{mm,x}} \right] \cdot f_{p,x} \quad (2.10)$$

dove, per ogni mese della stagione di climatizzazione estiva: W_{aux} è il fabbisogno di energia elettrica per gli ausiliari dell'impianto; Q_{Cr} è il fabbisogno effettivo per raffrescamento; Q_v è il fabbisogno per trattamenti dell'aria; η_{mm} è il coefficiente di prestazione medio mensile del sistema di produzione dell'energia frigorifera; $f_{p,el}$ è il fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria; $f_{p,x}$ è il fattore di conversione in energia primaria del vettore energetico x utilizzato dal generatore.

Il fabbisogno effettivo di energia richiesto per il raffrescamento, Q_{Cr} , si effettua partendo dal fabbisogno di energia termica utile ($Q_{C,nd}$) calcolato secondo la metodologia dettata dalla UNI/TS 11300-1 sommando progressivamente per ogni sottosistema (emissione, regolazione, distribuzione, accumulo) le perdite al netto di eventuali recuperi:

$$Q_{Cr} = Q_{C,nd} + Q_{l,C,e} + Q_{l,C,rg} + Q_{l,C,d} + Q_{l,C,s} - Q_{rr} \quad (2.11)$$

dove, per ogni mese della stagione estiva, $Q_{l,C,e}$ è la perdita di energia del sottosistema di emissione; $Q_{l,C,rg}$ è la perdita di energia del sottosistema di regolazione; $Q_{l,C,d}$ è la perdita di energia del sottosistema di distribuzione; $Q_{l,C,s}$ è la perdita di energia dal sottosistema di accumulo; Q_{rr} è la somma dell'energia recuperata attraverso recuperatori di calore e/o recuperata da climatizzatori dotati di recupero parziale o integrale del calore di condensazione per il post-riscaldamento in batterie di trattamento dell'aria.

2.4.2. Modelli a confronto attraverso l'applicazione ad un caso studio

Il metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario (UNI/TS 11300-1) e il metodo di calcolo dettagliato in regime dinamico (*EnergyPlus*) sono applicati ad un caso studio, di cui si è determinato il fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento per due differenti località italiane. Al fine di stimare l'errore associato all'utilizzo di un metodo di calcolo semplificato, si sono confrontati i termini dell'equazione di bilancio energetico dell'edificio in uscita dall'applicazione del metodo UNI/TS 11300-1 con i dati in uscita da *EnergyPlus*, costituiti dai termini dell'equazione di bilancio termico convettivo dell'aria ambiente. Questi ultimi sono ricavati applicando la procedura che prevede lo sviluppo di una serie di simulazioni numeriche in successione, caratterizzate da assunzioni differenti caso per caso, e dall'applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti, illustrato al par. 2.2.2.

Al fine di confrontare nel modo più corretto i fabbisogni di energia termica netta ottenuti con i due modelli analizzati (quasi-stazionario e dinamico), si è condotto uno studio finalizzato a rendere omogenee le procedure di calcolo e i dati di ingresso. In particolare si è proceduto, da una parte a uniformare i dati climatici a partire dal file climatico orario utilizzato per la simulazione dinamica, dall'altra sono state operate alcune modifiche al modello dettagliato al fine di adattarlo ad una comparazione con la metodologia semplificata.

Descrizione del caso studio

L'edificio oggetto di studio è la "Casa Vivaldi", descritta nella norma UNI EN 12831. Si tratta di un edificio residenziale ad un piano fuori terra ed un seminterrato con un sottotetto ed un vano scala non climatizzati. Nel piano seminterrato vi sono la cantina e il garage, non climatizzati, ed un locale hobby climatizzato. La testata ovest dell'edificio è in aderenza ad un altro edificio residenziale. Il piano terreno si trova a 0,5 m dal livello del suolo; parte del piano terreno è su un vespaio aerato. In Figura 2.18 sono rappresentate piante e sezioni dell'edificio con l'indicazione dei principali dati tipologico-dimensionali.

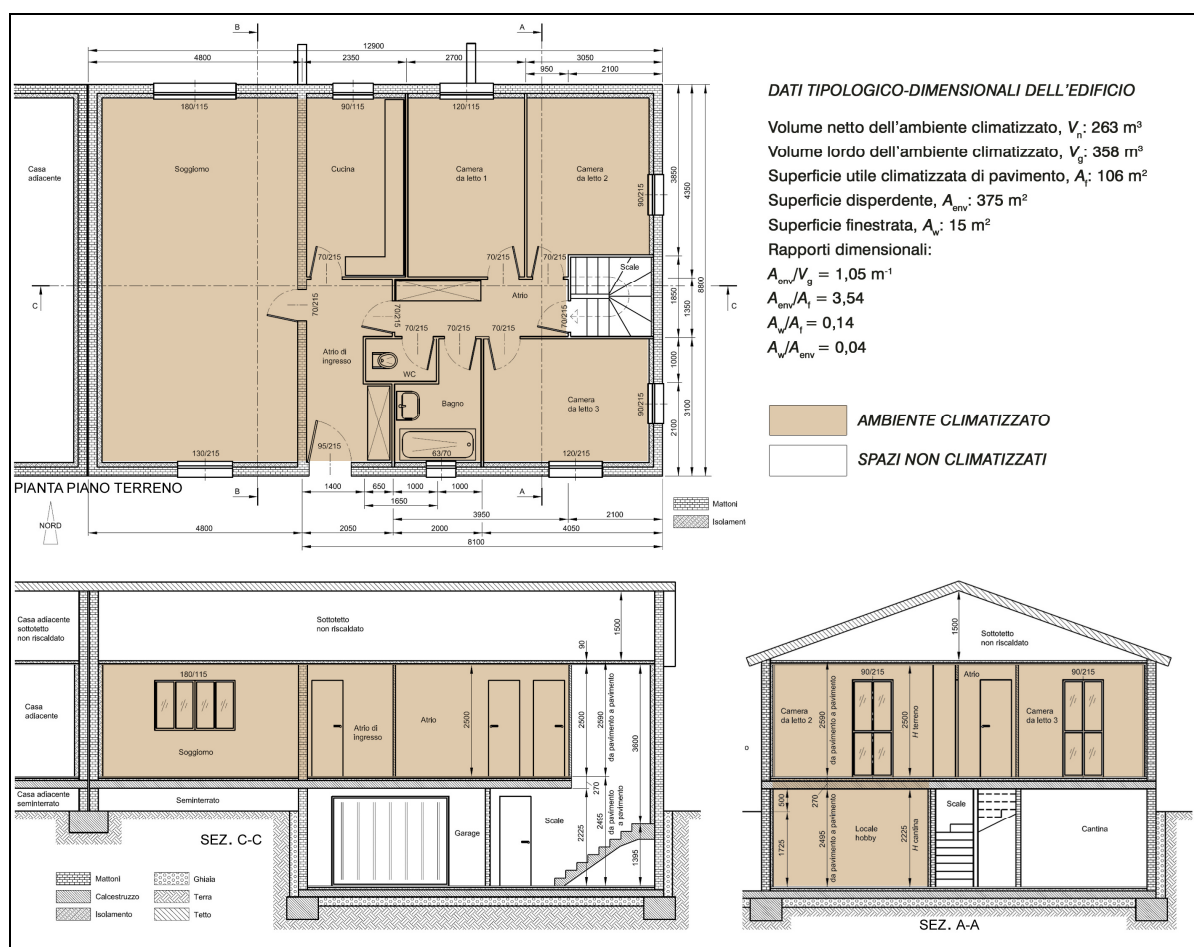


Figura 2.18 Piante e sezioni dell'edificio oggetto di studio ("Casa Vivaldi", UNI EN 12831).

La zona climatizzata dell'edificio è costituita da pareti perimetrali in mattoni leggeri con isolamento termico in polistirene; le pareti dei locali non climatizzati del piano seminterrato presentano la stessa conformazione di quelle soprastanti, ma sono prive di isolamento termico. Il soffitto del piano terreno, che separa l'ambiente riscaldato dal sottotetto non riscaldato, è costituito unicamente da uno strato isolante di lana di roccia, rifinito da uno strato di gesso; il pavimento del piano terreno è costituito da uno strato portante di calcestruzzo isolato con polistirene. Le superfici esterne dei componenti opachi sono di colore chiaro. I parametri termo-fisici dei componenti edilizi sono calcolati con le norme UNI EN ISO 6946 e UNI EN ISO 13786.

I componenti vetrati sono costituiti da vetro basso emissivo (4-16-4 mm) con aria nell'intercapedine ($U_{gl} = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$), da telaio in PVC con due camere cave ($U_F = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) e distanziatore in metallo. Il vetro presenta una trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale (g_n) pari a 0,67. Le schermature solari mobili sono installate sulle sole finestre a sud e sono costituite da veneziane esterne, integrate nell'edificio, aventi un fattore di riduzione pari a 0,35.

Non si riportano i dati impiantistici dell'edificio in esame poiché l'analisi numerica ha condotto alla determinazione del solo fabbisogno netto di energia termica per la climatizzazione invernale e non dell'energia primaria.

Per quanto riguarda i dati relativi alle modalità di occupazione e d'uso dell'edificio si sono utilizzati i valori della UNI/TS 11300-1, di seguito elencati:

- apporti interni di calore (valore medio mensile): $5,36 \text{ W/m}^2$
- tasso di ricambio d'aria (ventilazione naturale): $0,3 \text{ h}^{-1}$
- temperatura di regolazione (riscaldamento): $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- temperatura di regolazione (raffrescamento): $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$

L'edificio oggetto di studio è analizzato per due diverse località italiane: Torino e Napoli. I dati climatici utilizzati all'interno della simulazione dinamica (*EnergyPlus*) fanno parte della serie di dati nota come "IWECC". Gli stessi dati, in valore medio mensile, si sono applicati al metodo di analisi numerica in regime quasi-stazionario (UNI/TS 11300-1), in sostituzione dei valori dei dati climatici della norma UNI 10349, alla quale la specifica tecnica fa riferimento.

Opzioni per la congruenza dei modelli confrontati

Al fine di confrontare nel modo più corretto i fabbisogni di energia termica netta ottenuti con i due modelli analizzati, è stato condotto uno studio finalizzato a rendere omogenee le procedure di calcolo e i dati di input. Di seguito sono elencate le impostazioni di calcolo e le condizioni al contorno analizzate.

Ponti termici

Come è noto i modelli numerici di simulazione dinamica, tra i quali *EnergyPlus*, non prevedono nella modellazione dell'involucro edilizio l'analisi del flusso termico disperso attraverso i ponti termici, sottostimando spesso il valore dello scambio di energia termica per trasmissione. Per tenere conto dell'effetto dei ponti termici sullo scambio termico per trasmissione, nel modello dinamico si applica la seguente procedura: partendo dal valore del coefficiente di accoppiamento termico (H_{tr}) ricavato adottando i valori di trasmittanza termica lineare della norma UNI EN ISO 14683, per ogni superficie disperdente di area A ne è considerata una porzione A_1 di dimensione trascurabile, tale che la media delle trasmittanze termiche delle porzioni A_1 e $A-A_1$, pesata sulle rispettive aree, sia uguale al rapporto tra il coefficiente di accoppiamento termico calcolato e l'area totale A . Evidentemente, poiché la superficie fittizia A_1 è modellata a filo interno, i valori delle trasmittanze termiche lineari sono calcolati, per ogni ponte termico, rispetto alla dimensione interna. Per coerenza di calcolo, la valutazione dello scambio termico attraverso tutte le superfici disperdenti viene effettuata facendo riferimento alle dimensioni interne dei componenti.

Scambio termico verso il terreno

EnergyPlus prevede l'introduzione di valori di temperatura del terreno per la modellazione

dello scambio termico verso il terreno, mentre il metodo analitico da norma UNI/TS 11300-1 prevede la modellazione dell'effetto dello scambio termico con un valore di trasmittanza termica equivalente per la struttura su terreno, applicando come temperatura esterna la temperatura dell'aria invece della temperatura del terreno. Per considerare questo diverso approccio, si associa alle strutture contro terra in *EnergyPlus* la trasmittanza termica equivalente calcolata con la UNI EN ISO 13370 e al terreno un valore di temperatura medio mensile pari a quello dell'aria esterna.

Scambio termico verso ambienti non climatizzati

Per il calcolo analitico dei fattori di correzione dello scambio termico verso ambienti non climatizzati (*b*), si considera anche l'apporto dello scambio termico per ventilazione oltre che quello di trasmissione, secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 13789; parimenti nella modellazione in *EnergyPlus* si tiene conto di un ricambio d'aria della stessa entità negli ambienti non climatizzati per garantire la confrontabilità dei risultati.

Scambio termico su vespaio aerato

Per il vespaio aerato è calcolata la portata effettiva di aria circolante sulla base della dimensione delle aperture di aerazione e della velocità del vento, corretta per un opportuno fattore di schermatura secondo la UNI EN ISO 13370. Tale valore è inserito nel modello dinamico per simulare lo scambio termico attraverso il vespaio aerato nelle stesse condizioni della UNI/TS 11300-1.

Componenti trasparenti

Nel modello di calcolo in regime quasi-stazionario la trasmittanza termica dei componenti trasparenti è ricavata applicando il calcolo della norma UNI EN ISO 10077-1, a partire dai valori delle trasmittanze del vetro e del telaio. In *EnergyPlus*, poiché il serramento è definito, non a partire dalla trasmittanza dei suoi componenti (vetro e telaio), ma dai parametri fisici di ciascuno di essi, si è modellato un serramento con componenti dalle caratteristiche tali da determinare lo stesso valore di trasmittanza termica ottenuto con la norma tecnica. La stessa operazione è effettuata per ricavare il valore del coefficiente di trasmissione solare totale della vetrata e il fattore di riduzione della schermatura solare. Il componente vetrato in *EnergyPlus* presenta dei caratteri aggiuntivi, non contemplati nella specifica tecnica UNI/TS 11300-1, quali ad esempio la colorazione, le caratteristiche spettrali, etc.

Capacità termica interna dell'edificio

Nel modello di calcolo proposto dalla UNI/TS 11300-1 la capacità termica interna dell'edificio è determinata a partire dai valori della capacità termica areica interna dei componenti della struttura edilizia. Tali valori sono ricavati applicando la norma UNI EN ISO 13786. In *EnergyPlus*, invece,

attraverso il metodo alle differenze finite, viene calcolato in modo dettagliato il profilo dei flussi termici in ogni componente della struttura edilizia.

Apporti interni e ventilazione

Nel modello dinamico si è applicato il profilo giornaliero degli apporti interni riportato nella UNI/TS 11300-1. Il valore medio mensile degli apporti interni, ricavato a partire dal profilo giornaliero, è applicato nel calcolo in regime quasi-stazionario. Si è seguito un analogo approccio per determinare il tasso di ricambio d'aria, assunto pari a $0,3 \text{ h}^{-1}$ in valore medio.

Apporti solari

Nel calcolo degli apporti solari del metodo semplificato, il valore della frazione di tempo in cui la schermatura solare è utilizzata, pesato sull'irradianza solare incidente, è ricavato come il rapporto tra la somma dei valori orari di irradianza maggiori di 300 W/m^2 e la somma di tutti i valori di irradianza del mese considerato. Il valore della frazione di tempo nella UNI/TS 11300-1 è fornito in funzione del mese, dell'orientamento, ma per un'unica latitudine di riferimento. Nel modello dinamico, parimenti, la gestione della schermatura è prevista tale da essere attiva in presenza di valori orari di irradianza superiori a 300 W/m^2 . Inoltre, al fine di effettuare una più corretta comparazione tra i due modelli, per la simulazione dinamica si trascura il contributo solare negli ambienti non climatizzati.

Dati climatici

A partire dal file climatico orario (IWEC) per le località considerate, si determinano i valori medi mensili della temperatura dell'aria esterna, dell'irradianza solare sul piano orizzontale e per le varie esposizioni, della temperatura della volta celeste, della massa volumica e del calore specifico dell'aria, al fine di utilizzarli per la modellazione in regime quasi-stazionario.

Procedura per la determinazione dei termini del bilancio

Al fine di eliminare gli effetti dell'intermittenza sul fabbisogno di energia, si ipotizza un funzionamento continuo dell'impianto, assumendo un valore costante di temperatura interna per il riscaldamento pari a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e per il raffrescamento pari a $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Inoltre, per determinare il fabbisogno di energia dell'edificio in condizioni ideali e indipendenti dalle caratteristiche del sistema di riscaldamento/climatizzazione, si è considerato all'interno di *EnergyPlus* un sistema dalla capacità in riscaldamento e raffrescamento infinita.

Per ricavare tutti i termini del bilancio energetico dalla modellazione in regime dinamico e confrontarli con quelli ottenuti direttamente per mezzo della metodologia UNI/TS 11300-1 (cfr. equazioni 2.3 e 2.4) sono condotte per ciascuna località climatica due coppie di simulazioni in regime

dinamico, per la stagione di riscaldamento e per la stagione di raffrescamento. L'analisi è effettuata, a titolo esemplificativo, per il mese di gennaio e per il mese di luglio. Il percorso seguito riguarda le seguenti fasi:

- a) effettuazione di due simulazioni (1/20 e 1/26), fissando una temperatura interna di set-point in regime continuo pari rispettivamente a 20 °C e a 26 °C, trascurando gli apporti interni e utilizzando un file climatico tipo senza il contributo della radiazione solare. In questo modo si possono ricavare le perdite di energia per trasmissione e ventilazione, $Q_{H/C,ht}$, che sono pari al fabbisogno netto per riscaldamento, in un caso, e raffrescamento, nell'altro, calcolati ciascuno come somma algebrica del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento durante la/il stagione/mese considerata/o:

$$Q_{H,netto}^{(1)} = Q_{H,ht} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) = Q_{H,nd}^{(1/20)} - Q_{C,nd}^{(1/20)} \quad (2.12)$$

$$Q_{C,netto}^{(1)} = Q_{C,ht} = (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) = Q_{H,nd}^{(1/26)} - Q_{C,nd}^{(1/26)} \quad (2.13)$$

- b) effettuazione di due simulazioni (2/20 e 2/26), fissando una temperatura interna di set-point in regime continuo pari rispettivamente a 20 °C e a 26 °C, considerando tutti gli apporti interni e, mediante applicazione di un file climatico di tipo completo, anche gli apporti solari. Gli apporti termici totali si ricavano dalla simulazione 2 e corrispondono, per ciascuno/a stagione/mese, alla differenza tra il fabbisogno netto della simulazione 1 e il fabbisogno netto della simulazione 2:

$$Q_{H,gn} = Q_{H,ht} - Q_{H,netto}^{(2/20)} = Q_{H,netto}^{(1/20)} - Q_{H,netto}^{(2/20)} = Q_{H,netto}^{(1/20)} - (Q_{H,nd}^{(2/20)} - Q_{C,nd}^{(2/20)}) \quad (2.14)$$

$$Q_{C,gn} = Q_{C,ht} - Q_{C,netto}^{(2/26)} = Q_{C,netto}^{(1/26)} - Q_{C,netto}^{(2/26)} = Q_{C,netto}^{(1/26)} - (Q_{H,nd}^{(2/26)} - Q_{C,nd}^{(2/26)}) \quad (2.15)$$

Il fattore di utilizzazione si ricava come:

$$\eta_{H,gn} = \frac{Q_{H,ht} - Q_{H,netto}^{(2/20)}}{Q_{H,gn}} = \frac{Q_{H,netto}^{(1/20)} - Q_{H,nd}^{(2/20)}}{Q_{H,netto}^{(1/20)} - Q_{H,netto}^{(2/20)}} \quad (2.16)$$

$$\eta_{C,ls} = \frac{Q_{C,gn} - Q_{C,nd}^{(2/26)}}{Q_{C,ht}} = \frac{Q_{C,netto}^{(1/26)} - Q_{C,netto}^{(2/26)} - Q_{C,nd}^{(2/26)}}{Q_{C,netto}^{(1/26)}} \quad (2.17)$$

Analisi dei risultati

L'utilizzo di modelli di simulazione dinamici consente di considerare un maggiore numero di variabili responsabili del fabbisogno termico dell'edificio, e quindi di ottenere risultati più aderenti al reale comportamento dell'edificio. È chiaro, però, che nonostante lo sforzo per considerare condizioni di riferimento e di contorno congruenti, il differente approccio alla modellazione numerica fornisce risultati differenti; alcuni studi (Prada *et al.*, 2008) hanno mostrato che, per esempio, gli effetti della capacità termica dell'involucro sul fabbisogno di energia non sono

adeguatamente considerati nei modelli semplificati, nonostante si faccia ricorso a parametri dinamici approssimati.

Inoltre, la stessa procedura applicata per ricavare i termini del bilancio di energia termica dell'edificio nel metodo dettagliato, al fine di poterli confrontare con quelli del metodo semplificato, conduce ad una “alterazione” nella metodologia di calcolo dettagliata: il flusso termico che attraversa i componenti d'involucro edilizio è ricavato considerando l'assenza della radiazione solare e delle sorgenti di calore interne, mentre nella realtà esso è influenzato sia dalla radiazione solare che incide sulla superficie esterna dell'involucro edilizio sia dalla quota radiativa della potenza termica prodotta dalle sorgenti interne che è scambiata per irraggiamento con le superfici interne degli elementi edilizi.

Per contro, le procedure di calcolo semplificate sono spesso soggette a sensibilità differenti rispetto alla complessità dell'edificio ed ai suoi parametri caratteristici, quali il rapporto di forma, il rapporto tra superficie trasparente e opaca o la capacità termica interna, per cui gli scostamenti riscontrati sono anche legati al particolare sistema edificio-impianto analizzato.

Tabella 2.3 Confronto tra i risultati dell'applicazione del metodo di calcolo dettagliato (*EnergyPlus*, “*EP*”) e del metodo di calcolo semplificato (UNI/TS 11300-1, “*UNI/TS*”). Fabbisogno di energia netta per il riscaldamento e termini del bilancio per Torino e Napoli in riferimento al mese di gennaio.

Elemento di confronto	Torino				Napoli			
	<i>EP</i>	<i>UNI/TS</i>	$\Delta\%$ (<i>EP</i> risp. a <i>UNI/TS</i>)	$\Delta\%$ (<i>UNI/TS</i> risp. a <i>EP</i>)	<i>EP</i>	<i>UNI/TS</i>	$\Delta\%$ (<i>EP</i> risp. a <i>UNI/TS</i>)	$\Delta\%$ (<i>UNI/TS</i> risp. a <i>EP</i>)
$Q_{H,tr}$ [MJ]	8242	9196	- 10,4	+ 11,6	5243	5514	- 4,9	+ 5,2
$Q_{H,ve}$ [MJ]	1338	1338	0	0	797	800	0	+ 0,4
Q_{sol} [MJ]	494	590	- 16,3	+ 19,4	553	632	- 12,5	+ 14,3
Q_{int} [MJ]	1432	1526	- 6,2	+ 6,6	1433	1526	- 6,2	+ 6,5
$\eta_{H,gn}$ [-]	1	0,98	–	–	1	0,95	–	–
$Q_{H,nd}$ [MJ]	7654	8460	- 9,5	+ 10,5	4054	4266	- 5,0	+ 5,2

I fabbisogni di energia netta per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio sono calcolati per un mese caratteristico della stagione di riscaldamento (gennaio) ed un mese caratteristico della stagione di raffrescamento (luglio). Analizzando i risultati riportati in Tabella 2.3, si evince che la deviazione percentuale tra i due modelli di calcolo in riferimento al fabbisogno di energia netta per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) nel mese di gennaio è circa pari al 10% per Torino e al 5% per Napoli. Il metodo semplificato sovrastima lo scambio termico per trasmissione di circa il 12% per Torino e il 5% per Napoli; lo scostamento è dovuto principalmente alla differente metodologia di analisi prevista dai modelli utilizzati per il calcolo dello scambio termico attraverso i componenti opachi e trasparenti di involucro. Per esempio, il coefficiente di scambio termico liminare all'interfaccia interna ed esterna nel modello dinamico è variabile ora per ora, mentre con il metodo semplificato è considerato

costante; inoltre, la differente modellazione dello scambio termico verso ambienti non climatizzati comporta un ulteriore scostamento nella componente di energia termica dispersa per trasmissione.

La componente dovuta alla radiazione solare valutata con modelli in regime dinamico ha una notevole influenza sul valore del fabbisogno di energia e consente di apprezzare il peso della capacità termica dell'involucro a differenza del modello semplificato. L'energia termica dovuta agli apporti solari risulta essere sovrastimata, nel metodo semplificato, del 19% per Torino e del 14% per Napoli. La motivazione dello scostamento può essere imputata alla stessa metodologia di calcolo della UNI/TS 11300-1 che non prevede che una quota di radiazione solare entrante in ambiente venga, in seguito ad una serie di riflessioni, ritrasferita all'esterno. Tuttavia, lo scostamento più basso per la città di Napoli è probabilmente dovuto anche al fatto che la gestione delle schermature considerata nel modello semplificato (secondo i valori riportati nella UNI/TS 11300-1 essa è unica per tutte le latitudini e riferita alla città di Roma) è molto simile a quella che i valori di irradianza solare avrebbero comportato per Napoli. Inoltre, un'altra causa dello scostamento potrebbe ascriversi al fattore di esposizione che modifica il valore della trasmittanza di energia solare totale (g) per incidenze diverse da quella normale: tale valore è fisso nella UNI/TS 11300-1, mentre è variabile in *EnergyPlus*.

Per quanto riguarda gli apporti interni di calore, lo scostamento tra i due modelli è dovuto al fatto che il metodo dettagliato scorpora la potenza termica totale prodotta dalle sorgenti interne in una quota radiativa ed in una quota convettiva, assunte rispettivamente pari al 50% del valore totale; per cui, solo la parte convettiva costituisce carico diretto in ambiente, mentre la restante quota va a bilanciare il carico interno solo dopo successive riflessioni tra le superfici interne: in questa fase, una parte è ceduta all'aria per convezione, una parte è persa, ad esempio perché ceduta all'esterno per trasmissione dagli elementi d'involucro. Per contro, nel metodo semplificato gli apporti interni sono considerati globalmente convettivi e costituiscono quindi un carico termico diretto. Diverso è il fenomeno della ventilazione, che, di natura completamente convettiva, fa sì che tra i due metodi di calcolo non vi siano scostamenti.

Il maggiore divario tra i risultati dei due modelli di calcolo si manifesta nel fabbisogno di energia netta per il raffrescamento dell'edificio nel mese di luglio, secondo quanto indicato in Tabella 2.4. Il valore del fabbisogno determinato con *EnergyPlus*, rispetto a quello calcolato con la UNI/TS 11300-1, è circa il 50% per Torino e il 40% per Napoli; per cui il metodo semplificato sovrastima il fabbisogno di energia netta per il raffrescamento del 97% per Torino e del 67% per Napoli rispetto al metodo dettagliato. Le principali cause dello scostamento sono da ascriversi agli apporti solari e allo scambio termico per trasmissione.

Tabella 2.4 Confronto tra i risultati dell'applicazione del metodo di calcolo dettagliato (*EnergyPlus*, “EP”) e del metodo di calcolo semplificato (UNI/TS 11300-1, “UNI/TS”). Fabbisogno di energia netta per il raffrescamento e termini del bilancio per Torino e Napoli in riferimento al mese di luglio.

Elemento di confronto	Torino				Napoli			
	<i>EP</i>	<i>UNI/TS</i>	$\Delta\%$ (<i>EP</i> risp. a <i>UNI/TS</i>)	$\Delta\%$ (<i>UNI/TS</i> risp. a <i>EP</i>)	<i>EP</i>	<i>UNI/TS</i>	$\Delta\%$ (<i>EP</i> risp. a <i>UNI/TS</i>)	$\Delta\%$ (<i>UNI/TS</i> risp. a <i>EP</i>)
$Q_{C,tr}$ [MJ]	2241	1677	+ 33,6	- 25,2	1299	654	+ 98	- 49,7
$Q_{C,ve}$ [MJ]	205	205	0	0	68	68	0	0
Q_{sol} [MJ]	1051	1324	- 20,6	+ 26	1105	1277	- 13,5	+ 15,6
Q_{int} [MJ]	1424	1526	- 6,7	+ 7,2	1401	1526	- 8,2	+ 8,9
$\eta_{C,ls}$ [-]	0,804	0,98	–	–	0,922	1	–	–
$Q_{C,nd}$ [MJ]	509	1001	- 49	+ 96,7	1245	2081	- 40	+ 67,1

Per indagare le cause di scostamenti così importanti occorre conseguire un dettaglio maggiore, perciò è condotta un'ulteriore analisi; i singoli termini costituenti l'equazione di bilancio di energia termica dell'edificio sono scorporati nel seguente modo:

- lo scambio termico per trasmissione è scorporato in funzione degli elementi di involucro responsabili dello stesso;
- gli apporti solari sono attribuiti separatamente all'involucro opaco e all'involucro trasparente.

Inoltre, si rende necessario rintracciare la quota radiativa degli apporti interni che, trasferita per irraggiamento alle superfici interne, è successivamente ceduta da queste all'aria interna.

La procedura di scorporo, all'interno del metodo di calcolo dettagliato – a differenza di quanto avviene nel metodo semplificato che è di immediata realizzazione – è in realtà un'operazione alquanto complessa che porta alla scomposizione dei singoli termini del bilancio in funzione, da un lato delle sollecitazioni termiche dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno, dall'altro dei componenti d'involucro che contribuiscono al bilancio convettivo dell'aria interna. Quest'operazione rappresenta l'applicazione della metodologia di analisi termica illustrata al par. 2.1.

Al fine di identificare il peso di ciascuna *driving force* all'interno di ciascun termine dell'equazione di bilancio termico sull'aria interna (cfr. Eq. 2.18), è applicato il principio di sovrapposizione degli effetti attraverso l'effettuazione di una serie di simulazioni numeriche in successione, aggiungendo di volta in volta una diversa forzante (cfr. par. 2.2.2). In Tabella 2.5 è illustrata la relazione intercorrente tra i termini del bilancio convettivo sull'aria interna e le cause (sollecitazioni dinamiche) che determinano tali effetti.

$$\Phi_{conv} + \Phi_V + \Phi_{conv,IG} + \Phi_{syst} = C_{ai} \cdot \frac{dT_{ai}}{d\tau} \quad (2.18)$$

Tabella 2.5 Relazione tra i termini del bilancio convettivo sull'aria interna e le sollecitazioni dinamiche che li determinano (con i simboli "x"/ "-" è indicata l'esistenza/l'assenza di una correlazione).

	Temperatura dell'aria esterna	Sorgenti interne di calore	Radiazione solare sui componenti opachi	Radiazione solare sui componenti trasparenti
Φ_V	x	-	-	-
$\Phi_{conv,IG}$	-	x	-	-
$\Phi_{conv,OI}$	x	x	x	x
$\Phi_{conv,OE}$	x	x	x	x
$\Phi_{conv,W}$	x	x	x	x
Φ_V : potenza termica legata alla ventilazione $\Phi_{conv,IG}$: potenza termica convettiva riferita alle sorgenti interne di calore $\Phi_{conv,OI}$: potenza termica scambiata per convezione con l'aria interna dalle superfici interne dell'edificio $\Phi_{conv,OE}$: potenza termica scambiata per convezione con l'aria interna dagli elementi opachi d'involucro $\Phi_{conv,W}$: potenza termica scambiata per convezione con l'aria interna dagli elementi trasparenti d'involucro				

I risultati conseguenti all'analisi per i mesi di gennaio e luglio in riferimento alla città di Torino e per i mesi di gennaio e luglio in riferimento alla città di Napoli sono riportati rispettivamente in Figura 2.19, in Figura 2.20, in Figura 2.21 e in Figura 2.22, seguendo la modalità di rappresentazione dei risultati illustrata al par. 2.3.2. Occorre sottolineare come i singoli contributi al bilancio convettivo riferiti ai componenti edilizi (*Conv.* "n") siano incorporati nei seguenti elementi ("n"):

- chiusure trasparenti confinanti con l'ambiente esterno (*WS*);
- chiusure opache verticali confinanti con l'ambiente esterno (*Vert. EOS*);
- chiusure opache verticali confinanti con il terreno (*Vert. SGround*);
- chiusure opache orizzontali confinanti con il terreno (*Horiz. SGround*);
- partizioni interne verticali (pareti interne) confinanti con ambienti climatizzati alla stessa temperatura (*Vert. IS*);
- partizioni interne orizzontali (solai interpiano) confinanti con ambienti climatizzati alla stessa temperatura (*Horiz. IS*);
- partizioni interne verticali confinanti con ambienti non riscaldati (*Vert. ISUncond*);
- partizioni interne orizzontali confinanti con ambienti non riscaldati (*Horiz. ISUncond*).

I termini del bilancio non legati agli elementi edilizi sono costituiti dal contributo convettivo delle sorgenti termiche interne (*Conv. ISRC*) e dal contributo della ventilazione (*VENT*).

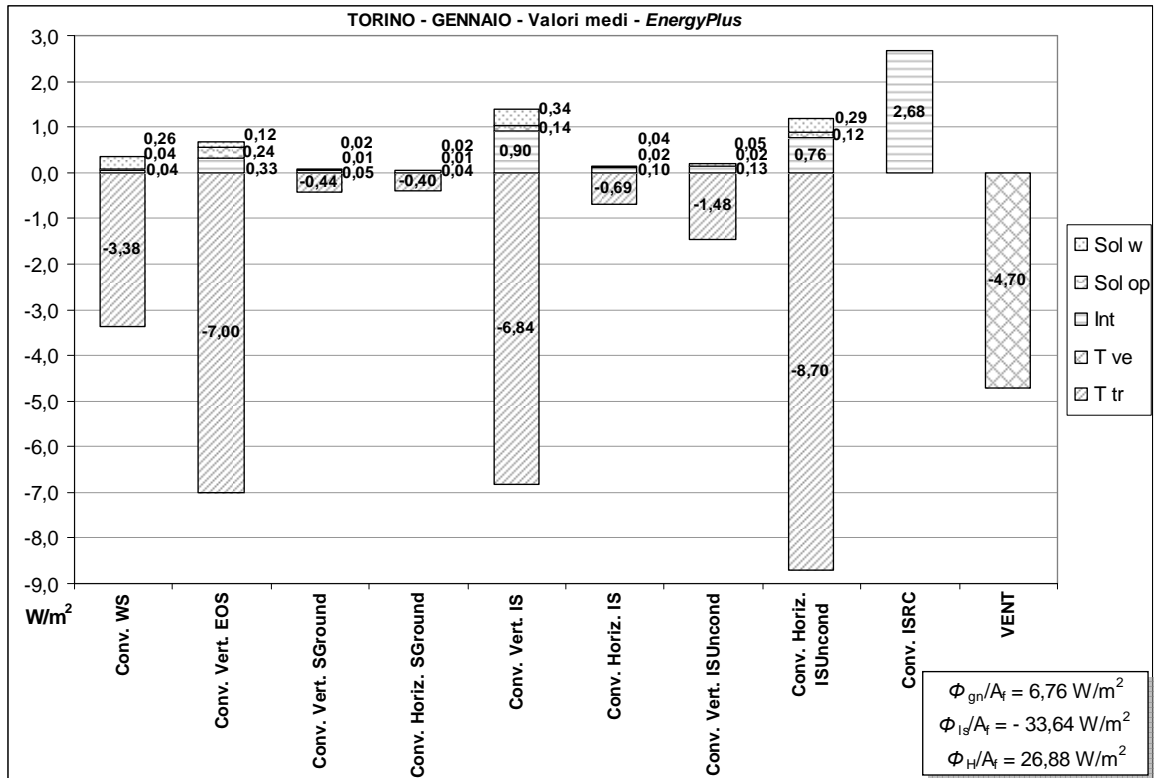


Figura 2.19 Termini del bilancio termico convettivo espressi in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche e in termini di potenza termica media per unità di pavimento climatizzato (gennaio, Torino), seguendo la rappresentazione riportata in Figura 2.10.

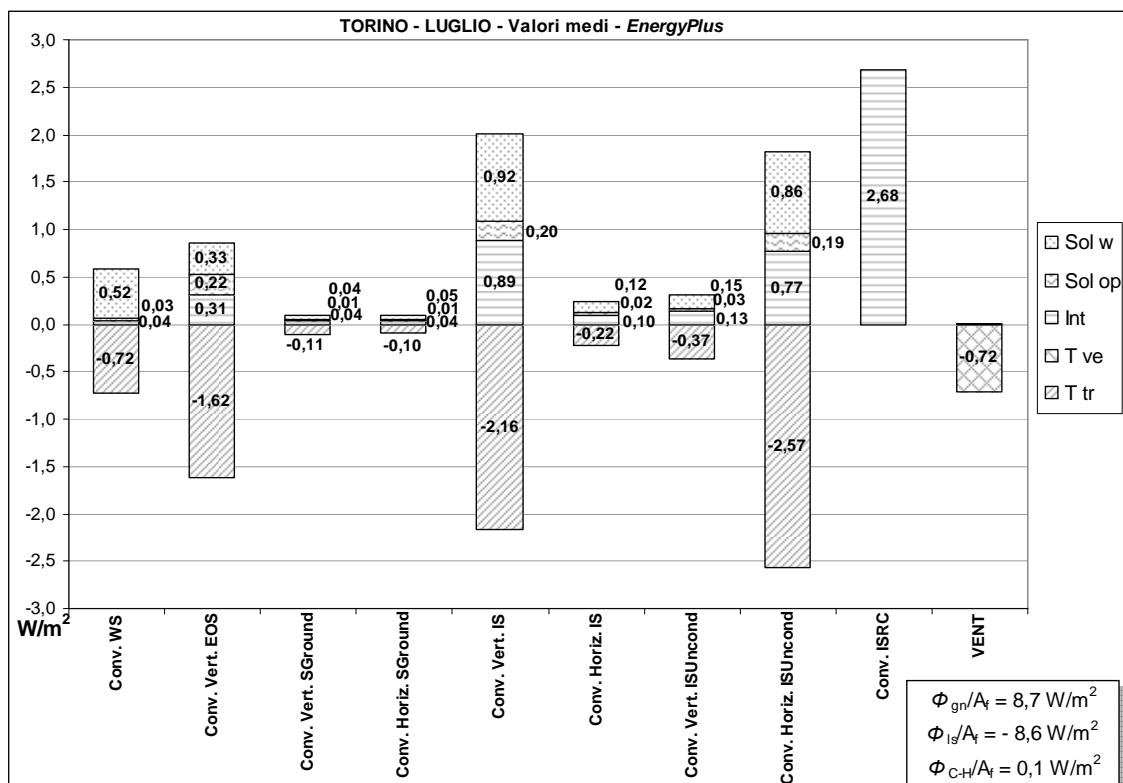


Figura 2.20 Termini del bilancio termico convettivo espressi in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche e in termini di potenza termica media per unità di pavimento climatizzato (luglio, Torino).

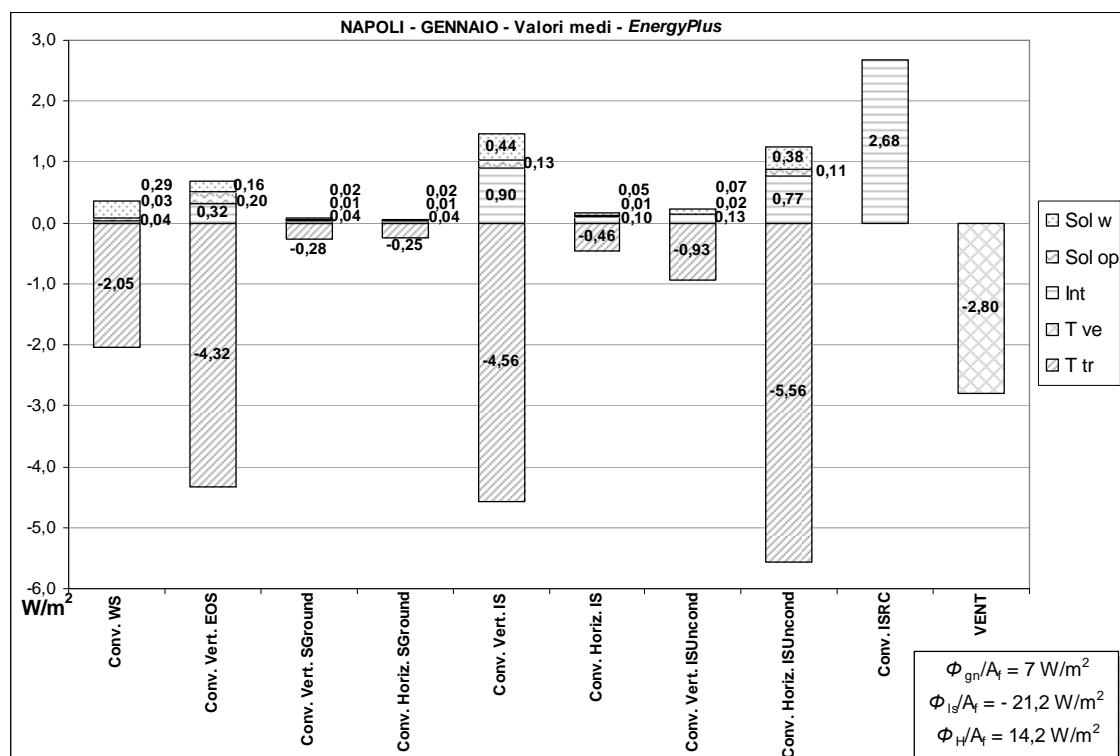


Figura 2.21 Termini del bilancio termico convettivo espressi in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche e in termini di potenza termica media per unità di pavimento climatizzato (gennaio, Napoli).

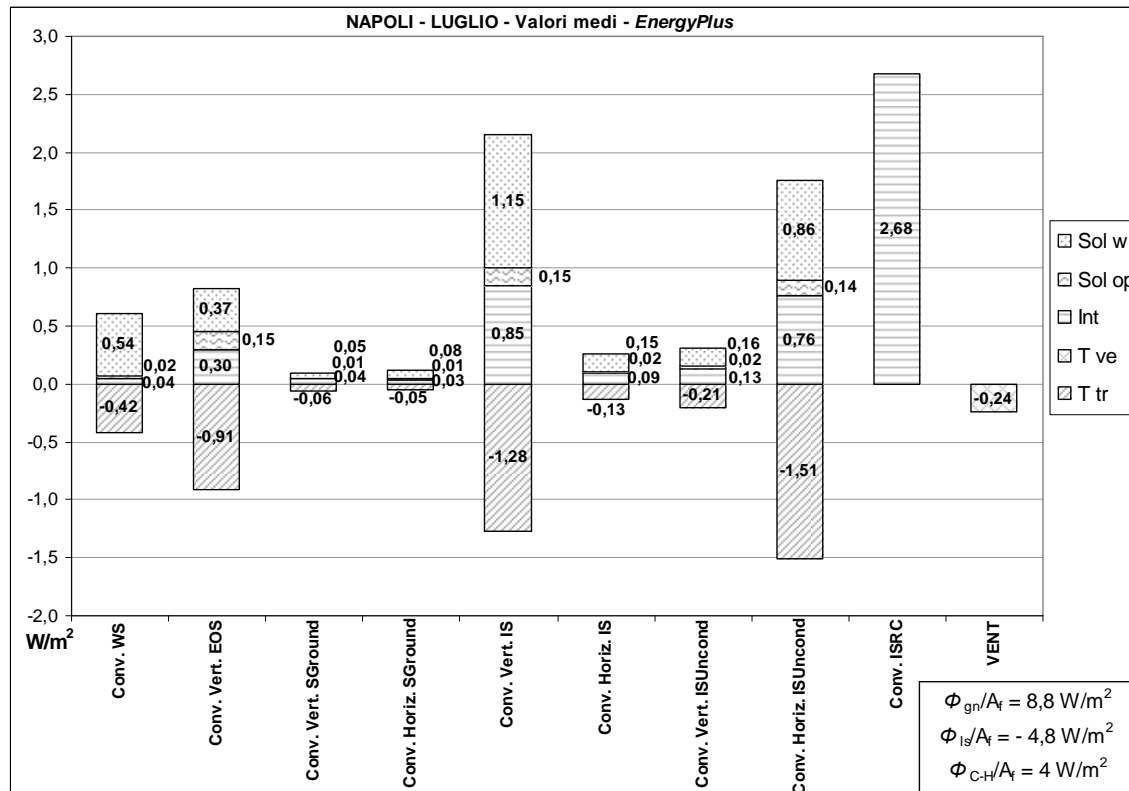


Figura 2.22 Termini del bilancio termico convettivo espressi in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche e in termini di potenza termica media per unità di pavimento climatizzato (luglio, Napoli).

Allo scorporo fa seguito un successivo accorpamento, mediante la somma dei flussi termici convettivi determinati dalla medesima sollecitazione. Questa fusione si rende necessaria per poter confrontare i termini dell'equazione di bilancio energetico ricavati con *EnergyPlus* con quelli ricavati attraverso l'applicazione della UNI/TS 11300-1 e riferiti ad ogni singolo elemento d'involucro o gruppi di componenti edilizi caratterizzati dalla medesima adiacenza (esterno, terreno, ambienti non climatizzati).

Tuttavia, come indicato in Tabella 2.5, al bilancio convettivo sull'aria interna contribuiscono anche i componenti edilizi interni alla struttura (pareti divisorie, solai interpiano), che scambiano calore per convezione dopo aver ceduto/acquisito energia termica per irraggiamento con le superfici interne degli elementi d'involucro opaco e trasparente. Poiché nella UNI/TS 11300-1 non è possibile valutare il flusso termico correlato alle superfici interne adiabatiche, i contributi dei termini relativi alle sollecitazioni della temperatura interna (T_{tr}), delle sorgenti interne di calore (Int) e della radiazione solare (Sol_{op} e Sol_w) – ricavati con *EnergyPlus* e riferiti agli elementi edilizi interni – sono assegnati a ciascun elemento d'involucro, utilizzando come criterio di suddivisione la superficie dell'elemento d'involucro stesso.

Da Figura 2.23 a Figura 2.26 è riportato il confronto tra i due modelli di calcolo per ciò che concerne il dettaglio dei termini del bilancio di energia termica, ricavati per *EnergyPlus* mediante l'operazione di accorpamento sopra descritta; i termini si riferiscono, rispettivamente, al riscaldamento (mese di gennaio) e al raffrescamento (mese di luglio) per Torino e per Napoli. Gli stessi scostamenti rilevati con l'analisi "sintetica" precedente sono qui spartiti tra più termini, in particolare:

- la percentuale di scostamento rilevata tra i due modelli in termini di flusso termico trasmesso è ascrivita ora separatamente ai componenti d'involucro trasparente ("*inv.w*"), ai componenti d'involucro opaco confinanti con l'esterno ("*inv.op esterno*"), ai componenti d'involucro opaco confinanti con il terreno ("*inv.op terreno*") e ai componenti d'involucro opaco confinanti con gli ambienti non climatizzati ("*inv.op ambienti non climatizzati*");
- la percentuale di scostamento rilevata tra i due modelli in termini di apporti solari è ascrivita ora separatamente ai componenti d'involucro trasparente ("*inv.w*") e ai componenti d'involucro opaco ("*inv.op*").

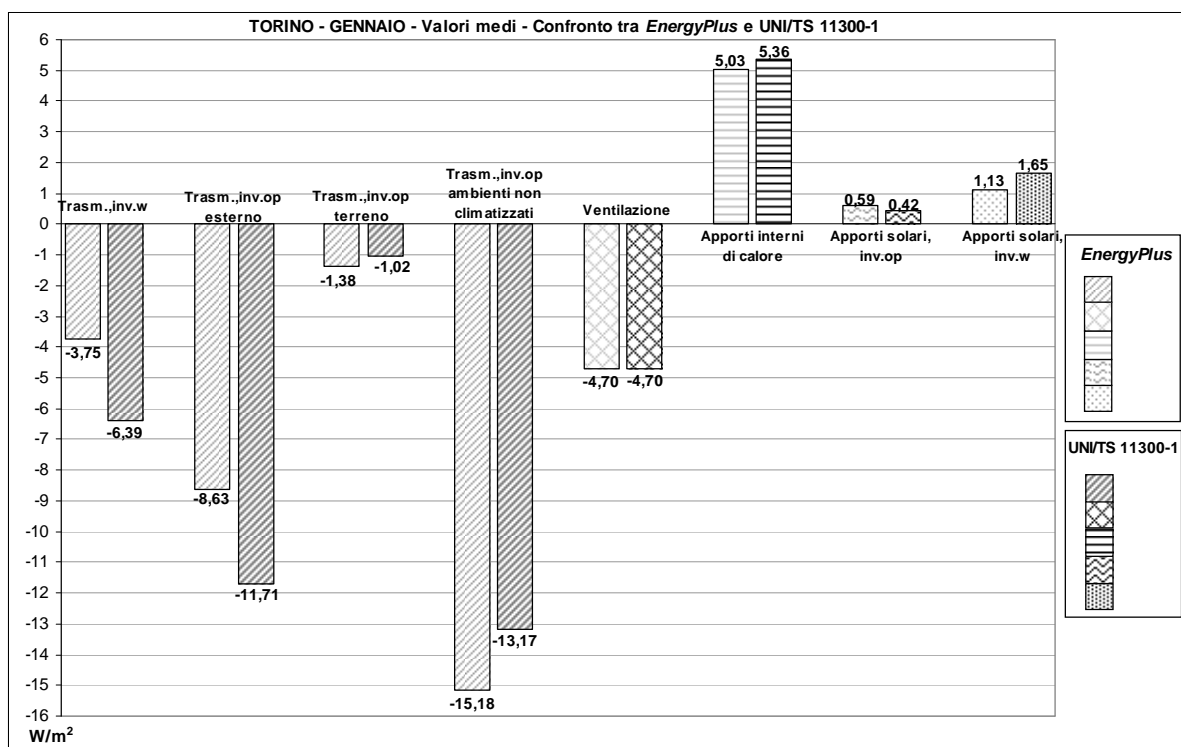


Figura 2.23 Confronto tra i termini dell'equazione di bilancio termico, espressi in termini di potenza termica per unità di pavimento climatizzato, calcolati con *EnergyPlus* e la UNI/TS 11300-1 (gennaio, Torino).

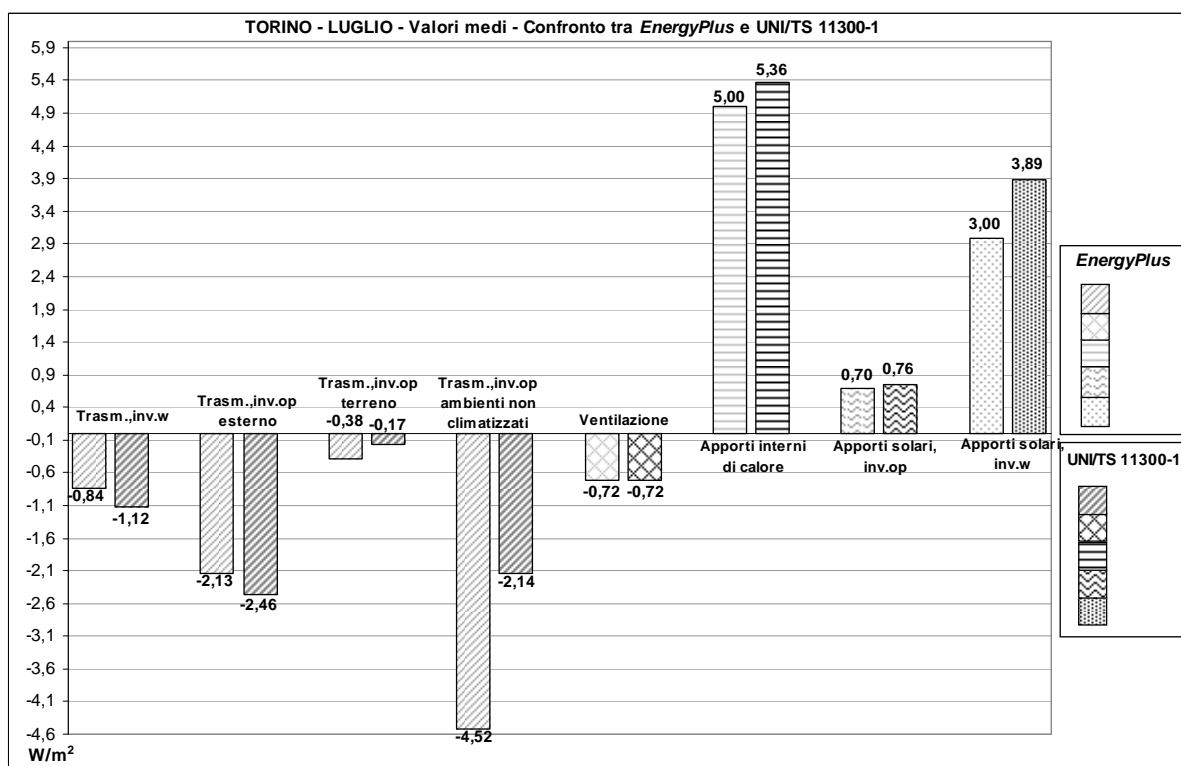


Figura 2.24 Confronto tra i termini dell'equazione di bilancio termico, espressi in termini di potenza termica per unità di pavimento climatizzato, calcolati con *EnergyPlus* e la UNI/TS 11300-1 (luglio, Torino).

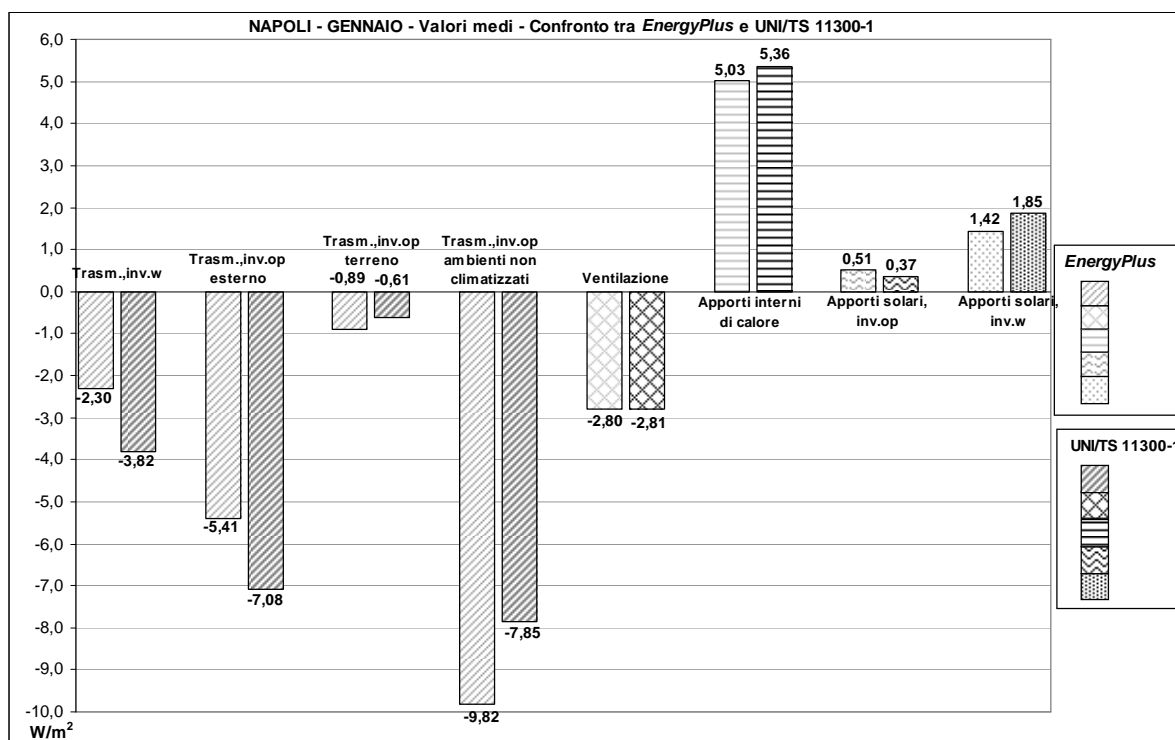


Figura 2.25 Confronto tra i termini dell'equazione di bilancio termico, espressi in termini di potenza termica per unità di pavimento climatizzato, calcolati con *EnergyPlus* e la UNI/TS 11300-1 (gennaio, Napoli).

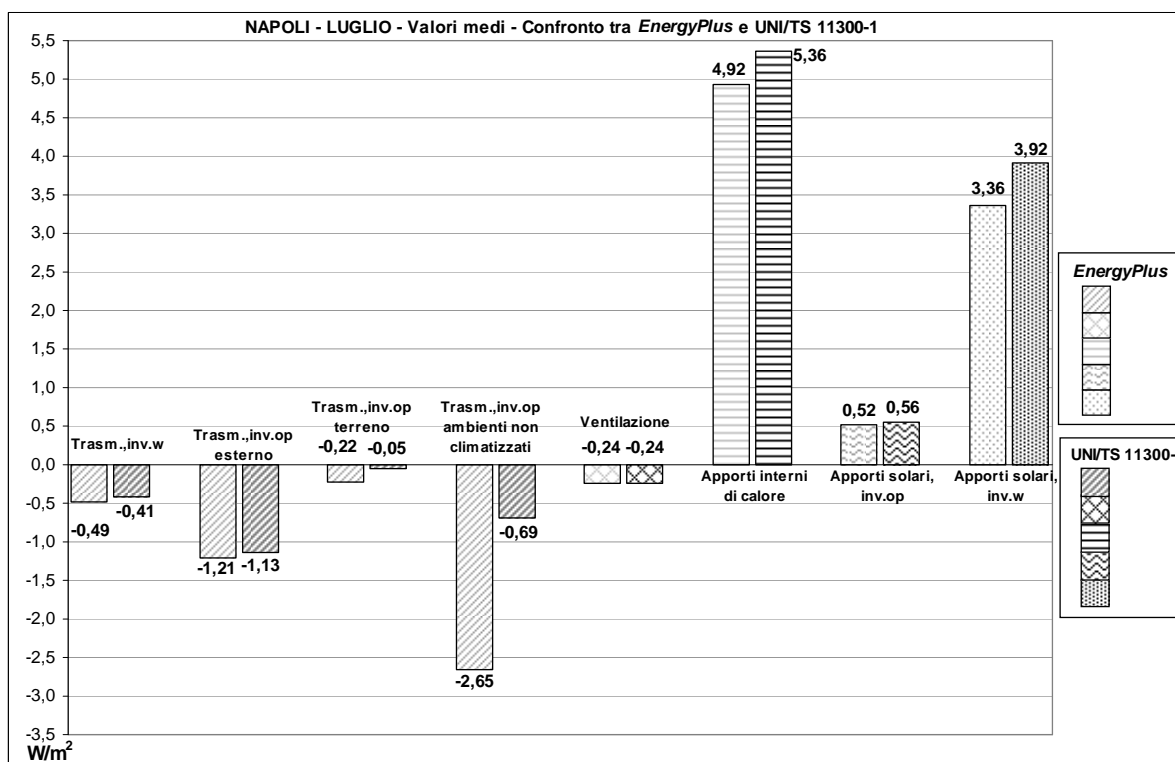


Figura 2.26 Confronto tra i termini dell'equazione di bilancio termico, espressi in termini di potenza termica per unità di pavimento climatizzato, calcolati con *EnergyPlus* e la UNI/TS 11300-1 (luglio, Napoli).

In linea generale, il divario tra i due modelli di calcolo in alcuni termini del bilancio è da

ascriversi principalmente alla diversa caratterizzazione dei flussi termici, puramente convettivi nel metodo semplificato e di natura mista nel metodo dettagliato, in cui la quota convettiva che bilancia le condizioni dell'aria interna – a meno della ventilazione e della quota convettiva delle sorgenti interne – è il risultato finale di scambi termici di natura radiativa tra le sorgenti di calore interne e le superfici interne, e tra le superfici stesse. Questo è uno degli aspetti principali che rende il metodo dettagliato, rispetto al metodo semplificato, uno strumento che ben riflette il reale comportamento termico dell'edificio. Un altro motivo di scostamento tra i due modelli, benché si siano inizialmente uniformate le condizioni al contorno ed alcune procedure di calcolo, è legato alla diversa composizione e struttura del calcolo.

Se si analizzano gli apporti solari, *EnergyPlus* considera i fenomeni di assorbimento della radiazione solare entrante (attraverso i componenti opachi e trasparenti d'involucro) da parte delle superfici interne, con conseguente scambio termico ad alta lunghezza d'onda tra le superfici stesse, e da queste il trasferimento dell'energia termica per convezione all'aria interna. Rispetto alla potenza termica relativa alla radiazione solare entrante globalmente, la quota che costituisce carico termico sull'aria interna è ridotta, perché, per effetto di successive riflessioni, una parte è ricondotta all'esterno. Se poi si fa riferimento alla sola radiazione a bassa lunghezza d'onda entrante in ambiente attraverso i serramenti, una parte è trasferita nuovamente all'esterno dai componenti trasparenti dopo successive riflessioni interne. Entrambi i fenomeni illustrati giustificano il valore più basso degli apporti solari nel metodo dettagliato, sia in relazione agli elementi d'involucro opaco sia in relazione agli elementi d'involucro trasparente, rispetto al metodo semplificato, in cui i termini del bilancio termico relativi alla radiazione solare sono considerati meramente convettivi e costituiscono carico interno diretto.

La maggiore deviazione tra i due modelli si riscontra nello scambio termico per trasmissione, e attraverso quest'analisi dettagliata emerge un divario maggiore per ciò che concerne gli elementi d'involucro che confinano con ambienti non climatizzati, soprattutto in regime di raffrescamento. Lo scostamento è da ascriversi, in parte al differente valore di temperatura interna degli ambienti non climatizzati nei due metodi di calcolo, in parte al criterio utilizzato per la suddivisione dei contributi convettivi degli elementi edilizi interni; entrambi gli aspetti dovranno essere sottoposti ad ulteriori approfondimenti.

I risultati ottenuti da questa indagine sui modelli di calcolo delle prestazioni termiche degli edifici, in particolare in riferimento al periodo di raffrescamento, mostrano i limiti del metodo di calcolo semplificato per stimare il comportamento termico degli edifici, soprattutto di quelli caratterizzati da notevole complessità, per i quali sarebbe auspicabile utilizzare la simulazione dinamica come modello di calcolo di riferimento.

Lo studio si rivela un'interessante applicazione del nuovo metodo di analisi termica degli edifici; l'impiego della metodologia illustrata nel presente capitolo permette di realizzare un'analisi

più precisa e dettagliata relativa al confronto tra i risultati in uscita dall'applicazione di due modelli di calcolo differenti. Dallo studio emerge come siano necessari ulteriori approfondimenti volti a validare e migliorare il metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario.

3. L'analisi parametrica di alcuni casi studio

Nel presente capitolo è presentata l'applicazione principale della nuova metodologia di analisi termica, finalizzata ad approfondire il tema dell'ottimizzazione del livello di isolamento termico nella progettazione estiva dell'edificio in riferimento a differenti profili d'uso e di tipologia edilizia. L'analisi riguarda l'individuazione dei parametri che maggiormente influenzano la prestazione degli edifici in regime di raffrescamento e si focalizza principalmente sullo studio dell'effetto dell'isolamento termico.

Nel par. 2.1 si è presentata l'impostazione metodologica e sottolineato come la modalità di indagine esplicitata permetta di comprendere in quali condizioni al contorno aumenti l'influenza dell'involucro sulla prestazione estiva e di conseguenza diventi importante la sua corretta progettazione. L'ulteriore approfondimento riguarda la parte opaca dell'involucro e il suo livello di isolamento termico.

Si sono individuati i fattori che contribuiscono a determinare la prestazione energetica degli edifici, che sono riassunti di seguito:

- microclima esterno;
- microclima interno (legato sia alla destinazione d'uso sia al profilo di utilizzo, elencati di seguito);
- destinazione d'uso;
- profilo di utilizzo;
- geometria dell'edificio (es. volume, rapporto di forma);
- estensione della superficie trasparente;
- parametri termici e solari della superficie trasparente;
- assorbimento solare della superficie esterna dell'involucro edilizio opaco;
- livello di isolamento termico e capacità termica dei componenti edilizi.

Ogni fattore può essere caratterizzato da uno o più parametri, il cui insieme di combinazioni definisce le diverse tipologie edilizie, i differenti sistemi costruttivi e i possibili usi dell'edificio. L'influenza dell'involucro edilizio opaco e in particolare del suo livello di isolamento termico sulla prestazione energetica dell'edificio è strettamente connessa all'influenza dell'involucro edilizio nel suo complesso. Solo studiando le varie combinazioni dei parametri che influenzano la prestazione energetica è possibile individuare il livello ottimale di isolamento termico per tutte le diverse configurazioni edilizie presenti nella realtà.

Non essendo possibile analizzare tutte le possibili combinazioni dei valori assunti dai singoli

parametri, si optato per la definizione di casi studio riferiti a un unico sito (microclima esterno), uso (microclima interno, destinazione d'uso e profilo di utilizzo) e geometria (volume, rapporto di forma). Per ciascun caso studio sono prese in considerazione le possibili combinazioni dei valori assunti dagli altri parametri – anch'essi scelti secondo una modalità predeterminata – che diventano le variabili di studio oggetto dell'analisi di sensibilità.

Occorre sottolineare che i risultati ottenuti dall'analisi dei casi studio scelti potranno essere estesi solamente ad edifici che presentano la medesima tipologia dimensionale, destinazione d'uso (con un preciso profilo di occupazione) e contesto climatico, che costituiscono i parametri prefissati all'interno dell'analisi.

3.1. I casi studio

I casi studio comprendono un edificio ad uso residenziale ed un edificio ad uso uffici: il primo è una casa monofamiliare a due piani fuori terra; il secondo è una costruzione multipiano, di cui solamente il piano-tipo è sottoposto ad analisi.

In riferimento al microclima esterno, per entrambi i casi studio si considera il clima della città di Roma (latitudine: 41°47'; longitudine: 12°13'; altitudine: 3 m). Il file climatico orario utilizzato per la simulazione numerica dettagliata, eseguita con il software *EnergyPlus*, è il file IWEC (*International Weather for Energy Calculations*). Secondo i valori riportati nel file climatico, con riferimento al mese di luglio, la temperatura media mensile è pari a 24,2 °C e l'irradianza solare giornaliera media mensile sul piano orizzontale è pari a 343 W/m².

Di seguito si riportano i parametri prefissati che caratterizzano rispettivamente l'edificio ad uso residenziale e l'edificio ad uso uffici.

3.1.1. Edificio ad uso residenziale

Dati generali e dati geometrici

L'edificio residenziale è una villetta monofamiliare a due piani fuori terra. Dal punto di vista geometrico (volume lordo riscaldato, superficie disperdente, superficie utile di pavimento ...), l'edificio coincide con la casa passiva oggetto di studio all'interno del capitolo 4. Tuttavia, mentre la casa passiva è un edificio reale in fase di costruzione in provincia di Modena, l'edificio analizzato nel presente capitolo è un modello di studio teorico utilizzato per l'analisi parametrica.

Si riporta in Figura 3.1 il modello tridimensionale dell'edificio, realizzato mediante il software *DesignBuilder*, con l'indicazione dell'orientamento geografico dell'edificio; in Tabella 3.1 sono elencati i principali dati tipologico-dimensionali.

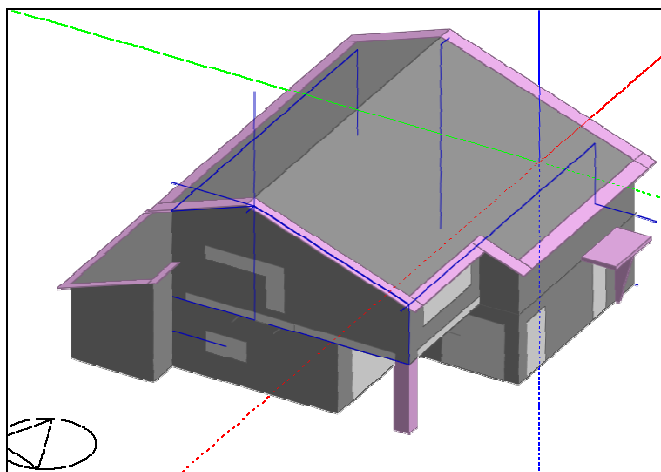


Figura 3.1 Immagine dell'edificio residenziale oggetto di studio (la modellazione geometrica dell'edificio è stata realizzata con il software *DesignBuilder*).

Tabella 3.1 Principali dati tipologico-dimensionali dell'edificio residenziale.

A_f [m ²]	192,42	V_n [m ³]	758	A_{env}/V_g [m ⁻¹]	0,60
A_{env} [m ²]	710	V_g [m ³]	1191	A_{env}/A_f	3,69

Il primo piano fuori terra è adiacente al terreno per una superficie netta di 108 m². Al piano terreno vi sono la cucina (41,6 m²), il locale tecnico e un bagno (23,5 m²), il soggiorno (43,4 m²). Il secondo piano fuori terra è parzialmente soppalcato ed è costituito da una camera da letto grande (23,2 m²), il relativo bagno (8,95 m²), una camera da letto piccola (17,7 m²), il relativo bagno (5,20 m²), un ripostiglio (1,75 m²) e il corridoio (27,2 m²). Ciascun locale è stato modellato come una singola zona termica: l'edificio è perciò costituito da nove diverse zone termiche, di cui due (soggiorno e corridoio del soppalco) non completamente chiuse, in quanto direttamente collegate senza elementi divisorii. Gli ambienti al primo piano fuori terra hanno altezza netta interna pari a 3 m, mentre le stanze al secondo piano fuori terra hanno altezze variabili perché costituiscono la zona sottotetto.

L'edificio non presenta superfici confinanti con altri edifici, essendo costruito su un lotto isolato; inoltre, non esistono edifici od ostacoli esterni nel contesto che possano ombreggiare le superfici esterne, a meno delle forme di ombreggiamento fisse dell'edificio (sporto del tetto e loggia).

Dati relativi all'uso: apporti interni di calore

Il profilo d'utilizzo dell'edificio è un aspetto fondamentale nell'analisi energetica; esso determina l'andamento giornaliero degli apporti termici interni e la variabilità nell'utilizzo della ventilazione naturale. Il valore globale degli apporti termici interni è ricavato dalla normativa tecnica, considerando i dati d'ingresso relativi ad un'utenza convenzionale. Il valore medio mensile degli apporti interni è determinato secondo il prospetto G.12 (cfr. Figura 3.2) della norma UNI EN ISO 13790 per la tipologia delle “*Single-family houses*” e l'equazione G.7 (cfr. Figura 3.3) della stessa

norma. Si è modulato il profilo d'uso secondo l'andamento dei flussi termici interni riportato nel prospetto G.8. (cfr. Figura 3.4) della stessa norma e nell'identico prospetto 9 (cfr. Figura 3.5) della specifica tecnica UNI/TS 11300-1; tuttavia i valori orari di questo prospetto sono stati corretti (cfr. Tabella 3.2), affinché il valore medio mensile rispettasse quello determinato mediante il calcolo a partire dal prospetto G.12 e dall'equazione G.7 della UNI EN ISO 13790.

Table G.12 — Example of conventional input data related to occupancy													
Building type	a	b	c	d	e	f	g	h	i) Other types				Unit
Building category	Single-family houses	Apartment blocks	Offices	Education buildings	Hospitals	Restaurants	Trade services	Sports facilities	Meeting halls	Industrial buildings	Warehouses	Indoor swimming pools	
Input data													
Internal set-point temperature in winter	20	20	20	20	22	20	20	18	20	18	18	28	°C
Internal set-point temperature in summer	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	28	°C
Area per person (occupancy)	60	40	20	10	30	5	10	20	5	20	100	20	m ² /person
Average heat flow per person	70	70	80	70	80	100	90	100	80	100	100	60	W/person
Metabolic gain per conditioned floor area	1,2	1,8	4,0	7,0	2,7	20,0	9,0	5,0	16,0	5,0	1,0	3,0	W/m ²
Presence time per day (monthly average)	12	12	6	4	16	3	4	6	3	6	6	4	h
Annual electricity use per conditioned floor area ^a	20	30	20	10	30	30	30	10	20	20	6	60	kWh/m ²
Part of electricity use within conditioned part of building	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,7	—
Airflow rate with external air per conditioned floor area ^a	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,2	0,7	0,7	1,0	0,7	0,3	0,7	m ³ /(h·m ²)
Airflow rate with external air per person	42	28	14	7	30	6	7	14	5	14	30	14	m ³ /(h·person)
Heating need for hot water per conditioned floor area ^a	10	20	10	10	30	60	10	80	10	10	1,4	80	kWh/m ²
^a These figures refer to the gross conditioned area, calculated with external building dimensions. This area includes all conditioned space contained within the thermal insulation layer. For example, an internal unheated (but indirectly heated) staircase is included, but a cellar is not.													

Figura 3.2 Prospetto G.12 della norma tecnica UNI EN ISO 13790 in cui sono riportati valori convenzionali relativi all'occupazione utili per valutazioni energetiche. Alcuni dati sono necessari per l'applicazione dell'equazione G.7. riportata in Figura 3.3 (per le "Single-family houses").

The average internal heat gains, Q_{int} , can be normalized to conditioned floor area. It can be calculated from:

$$Q_{\text{int}} = A_f \left(\frac{Q_P}{A_P} + f_E q_E \right) \quad (\text{G.7})$$

where

A_f is the conditioned floor area used for the calculations;

A_P is the conditioned floor area per person (occupancy);

Q_P is the average heat gain per person;

q_E is the electricity use per reference floor area;

NOTE This quantity q_E serves to compute internal heat gains. It is the electricity not already taken into account for heating, cooling or hot water.

f_E is the fraction of the total electricity used within the building, i.e. the part of the electricity used that is transformed into heat within the conditioned space. This factor equals 1 if there are no electrical appliances outside the conditioned space.

Figura 3.3 Estratto della norma tecnica UNI EN ISO 13790 riportante l'equazione G.7 che si applica per il calcolo degli apporti interni di calore. I dati necessari per il calcolo sono riportati nel prospetto G.12 della stessa norma (cfr. Figura 3.2 per le "Single-family houses").

Table G.8 — Heat flow rate from occupants and appliances; default values in the absence of national values; detailed values for residential buildings			
Days	Hours	Residential buildings	
		Living room plus kitchen $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})/A_f$ W/m ²	Other conditioned areas (e.g. bedrooms) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})/A_f$ W/m ²
Monday to Friday	07.00 to 17.00	8,0	1,0
	17.00 to 23.00	20,0	1,0
	23.00 to 07.00	2,0	6,0
	Average	9,0	2,67
Saturday and Sunday	07.00 to 17.00	8,0	2,0
	17.00 to 23.00	20,0	4,0
	23.00 to 07.00	2,0	6,0
	Average	9,0	3,83
Average		9,0	3,0

Figura 3.4 Prospetto G.8 della norma tecnica UNI EN ISO 13790 con il profilo giornaliero e settimanale degli apporti interni, per tipo di locale interno all'abitazione. Per l'analisi, i valori riportati sono sostituiti con i valori della Tabella 3.2.

prospetto 9		Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)	
Giorni	Ore	Soggiorno e cucina ($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}/A_f$) W/m ²	Altre aree climatizzate (per esempio stanza da letto) ($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}/A_f$) W/m ²
Lunedì - Venerdì	07.00 - 17.00	8,0	1,0
	17.00 - 23.00	20,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	2,67
Sabato - Domenica	07.00 - 17.00	8,0	2,0
	17.00 - 23.00	20,0	4,0
	23.00 - 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	3,83
Media		9,0	3,0

Figura 3.5 Prospetto 9 della specifica tecnica UNI/TS 11300-1 con il profilo giornaliero e settimanale degli apporti interni, per tipo di locale interno all'abitazione (i valori sono gli stessi del prospetto G.8 della UNI EN ISO 13790, in Figura 3.4). Per l'analisi, i valori riportati sono sostituiti con i valori della Tabella 3.2.

Tabella 3.2 Profilo giornaliero e settimanale degli apporti interni, in W/m², per tipo di locale interno all'abitazione, utilizzato per l'analisi.

GIORNI	ORE	SOGGIORNO E CUCINA [W/m ²]	ALTRE AREE CLIMATIZZATE [W/m ²]
Lunedì - Venerdì	07:00 - 17:00	3,28	0,41
	17:00 - 23:00	8,20	0,41
	23:00 - 07:00	0,82	2,47
	Media	3,69	1,10
Sabato - Domenica	07:00 - 17:00	3,28	0,82
	17:00 - 23:00	8,20	1,64
	23:00 - 07:00	0,82	2,46
	Media	3,69	1,57
Media		3,69	1,23

Questa operazione viene effettuata perché il valore medio risultante dai valori orari riportati nel prospetto G.8 della norma tecnica è assai discordante con il dato medio mensile fornito dall'applicazione dell'equazione G.7 e dal prospetto G.12 per le “*Single-family houses*”. Esso, infatti, oltre ad essere utilizzato per una valutazione di tipo “adattata all'utenza” nella UNI/TS 11300-1, è più vicino al valore ricavabile dai prospetti della UNI EN ISO 13790 per gli “*Apartment blocks*”.

Inoltre, il valore medio mensile ricavato ai fini di quest'analisi con la UNI EN ISO 13790 coincide con quello fornito dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-1 al par. 13.1.1 (cfr. Figura 3.6) per gli edifici ad uso residenziale e per le valutazioni energetiche di tipo “standard”. Poiché la superficie utile di pavimento dell'edificio oggetto di studio è superiore a 170 m², il valore globale degli apporti interni è 450 W, ovvero 2,34 W/m².

Per gli edifici di categoria E.1 (1) e E.1 (2) (abitazioni), aventi superficie utile di pavimento, A_f , minore o uguale a 170 m^2 , il valore globale degli apporti interni, espresso in W, è ricavato come

$$\Phi_{\text{int}} = 5,294 \times A_f - 0,01557 \times A_f^2$$

Per superficie utile di pavimento maggiore di 170 m^2 il valore di Φ_{int} è pari a 450 W .

Figura 3.6 Estratto della specifica tecnica UNI/TS 11300-1 (par. 13.1.1) per il calcolo degli apporti interni di calore per edifici ad uso residenziale e per le valutazioni energetiche di tipo “standard”.

Ai fini della simulazione numerica dettagliata, gli apporti interni sono considerati per metà di tipo convettivo e per metà di tipo radiativo, come anche indicato nella stessa UNI EN ISO 13790.

In Figura 3.7 si riporta il profilo orario degli apporti interni dell’edificio residenziale oggetto di studio (soggiorno, cucina e altre stanze) per una settimana-tipo; il grafico è ricavato dai valori della Tabella 3.2. Con la linea tratteggiata è indicato il valore medio.

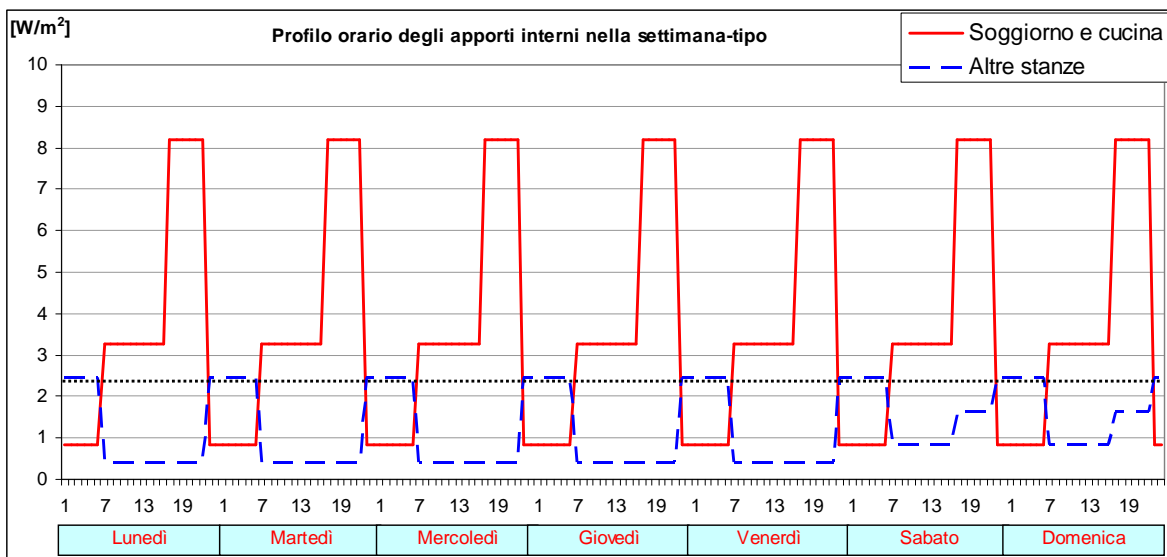


Figura 3.7 Profilo orario degli apporti interni globali nella settimana-tipo, suddiviso per soggiorno, cucina e altre stanze dell’edificio residenziale oggetto di studio.

Dati relativi all'uso: ventilazione

La ventilazione degli ambienti della residenza è considerata di entità tale da garantire un livello accettabile di qualità dell'aria interna. Un tasso più elevato di ventilazione naturale (aumento della portata di aria esterna) è ammesso solo come strategia di abbattimento dei carichi interni ed è considerato successivamente nella trattazione (cfr. capitolo 4). Si stabilisce, inoltre, che la qualità dell'aria interna sia sempre garantita, ovvero che la portata d'aria minima di aria esterna venga introdotta in ambiente naturalmente, quando le condizioni ambientali esterne lo consentono, o meccanicamente, mediante l'ausilio di ventilatori.

La norma tecnica a cui si fa riferimento per la definizione del tasso minimo di ricambio d'aria dell'edificio residenziale è la UNI EN 15251, che specifica, tra l'altro, la procedura e i valori da utilizzare per l'effettuazione di analisi energetiche. Negli edifici residenziali, la qualità dell'aria interna dipende da molti parametri, come il numero di persone e il tempo di occupazione, le emissioni derivanti dalle attività (fumo, emissione di vapore, cucina intensiva), le emissioni provenienti dall'arredo, dai prodotti per la pulizia, dalle attività connesse allo svago. L'entità della ventilazione naturale, intesa come ingresso di aria di rinnovo, è definita nella UNI EN 15251 separatamente per le ore di occupazione e per le ore di non occupazione.

Per le ore di occupazione la norma tecnica specifica che il raggiungimento di un determinato livello di qualità dell'aria interna in edifici residenziali dipende principalmente da tre operazioni:

- l'estrazione di inquinanti nei locali più umidi (servizi igienici, bagni, cucine);
- la ventilazione generale di tutte le stanze nell'abitazione;
- la ventilazione generale di tutte le stanze nell'abitazione mediante introduzione di aria di rinnovo solo nelle stanze principali (soggiorni e camere da letto) e trasferimento dell'aria a tutti i locali.

Queste operazioni possono essere effettuate secondo tre modalità differenti:

- l'estrazione nei locali più umidi è necessaria al fine di rimuovere gli inquinanti presenti in queste aree ed è perciò indispensabile porre questi locali in depressione;
- la ventilazione generale si basa sul fatto che tutte le stanze devono essere ventilate, consentendo in alternativa di trasferire aria dai locali principali (soggiorno, camere da letto), attraverso i corridoi, ai locali più umidi (cucina, bagni, servizi igienici);
- in alcuni casi si considera il tasso di ventilazione globale per tutto l'edificio, in altri casi si considera prioritario il tasso minimo di aria di rinnovo per le camere da letto e i soggiorni. Questa seconda scelta permette di conseguire lo stesso livello globale di qualità dell'aria in presenza di un eventuale impianto di ventilazione che introduce aria solo nei locali realmente occupati.

La portata d'aria esterna considerata per le ore di occupazione dell'edificio residenziale è

determinata seguendo la procedura riportata nell'appendice B della UNI EN 15251, in cui si considera un uso convenzionale della residenza. Secondo questa procedura occorre calcolare il tasso di ventilazione globale dell'edificio, prima secondo la superficie di pavimento, poi secondo il numero di occupanti o il numero di camere da letto (in riferimento alla superficie del soggiorno e delle camere da letto), utilizzando come portate d'aria di riferimento i valori del prospetto B.5 della norma tecnica (cfr. Figura 3.8) in relazione alla categoria di qualità (è scelta quella intermedia). Dei due valori individuati, come indicato nella norma tecnica, si considera il maggiore; in questo caso, per l'edificio oggetto di studio, esso corrisponde al dato normalizzato rispetto alla superficie dei locali principali (soggiorno e camere da letto).

Seguendo questa procedura si considera che l'estrazione dell'aria avvenga in cucina, bagno e servizi igienici, e che l'aria di rinnovo sia fornita principalmente al soggiorno e alle camere da letto. Inoltre, se si utilizzano i valori forniti dal prospetto B.5 della UNI EN 15251 si considera una miscelazione perfetta dell'aria all'interno del locale e la concentrazione degli inquinanti è assunta in misura uguale nelle zone occupate e nelle zone in cui ha sede l'estrazione.

Table B.5 - Example of ventilation rates for the residences. Continuous operation of ventilation during occupied hours. Complete mixing							
Category	Air change rate ^a		Living room and bedrooms, mainly outdoor air flow		Exhaust air flow, l/s		
	l/s,m ²	ach	l/s, pers ^b	l/s,m ²	Kitchen	Bathrooms	Toilets
	(1)		(2)	(3)	(4a)	(4b)	(4)
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1,0	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7
^a The air change rates expressed in l/s,m ² and ach correspond to each other when the ceiling height is 2,5 m.							
^b The number of occupants in a residence can be estimated from the number of bedrooms. The assumptions made at national level have to be used when existing, they may vary for energy and for IAQ calculations.							

Figura 3.8 Prospetto B.5 della norma tecnica UNI EN 15251 in cui sono riportati i valori di riferimento utilizzati per il calcolo della portata di ventilazione dell'edificio residenziale. I valori si differenziano in funzione del criterio che si considera per garantire la qualità dell'aria interna e della categoria della stessa.

La norma tecnica UNI EN 15251 specifica che durante i periodi di non occupazione deve essere comunque garantito un minimo livello di ventilazione, che può variare tra 0,05 e 0,1 l/(s·m²). Nello studio si considera come livello minimo di ventilazione nelle ore di non occupazione il valore più alto compreso nell'intervallo fornito, ossia 0,1 l/(s·m²).

Le portate d'aria esterna ricavate per le ore di occupazione e le ore di non occupazione sono convertite, per comodità, in tassi di ricambi d'aria riferiti a tutto l'edificio. Il profilo giornaliero e settimanale del tasso di ricambio d'aria, riportato in Tabella 3.3, è modellato per singolo ambiente

dell'edificio (considerato occupato o non occupato) coerentemente con lo schema utilizzato per gli apporti interni (cfr. Tabella 3.2). In Figura 3.9 è delineato il profilo orario del tasso di ricambio d'aria per la settimana-tipo dell'edificio residenziale oggetto di studio (soggiorno/cucina e altre stanze); il grafico è ricavato dai valori della Tabella 3.3. Con la linea tratteggiata è indicato il valore medio.

Tabella 3.3 Profilo giornaliero e settimanale del tasso di ricambio d'aria in h^{-1} , per tipo di locale interno all'abitazione, utilizzato per lo studio.

GIORNI	ORE	SOGGIORNO/CUCINA [h^{-1}]	ALTRE AREE CLIMATIZZATE [h^{-1}]
Lunedì - Venerdì	07:00 - 17:00	0,53	0,09
	17:00 - 23:00	0,53	0,09
	23:00 - 07:00	0,09	0,53
	Media	0,38	0,24
Sabato - Domenica	07:00 - 17:00	0,53	0,53
	17:00 - 23:00	0,53	0,09
	23:00 - 07:00	0,09	0,53
	Media	0,38	0,42
Media		0,38	0,29

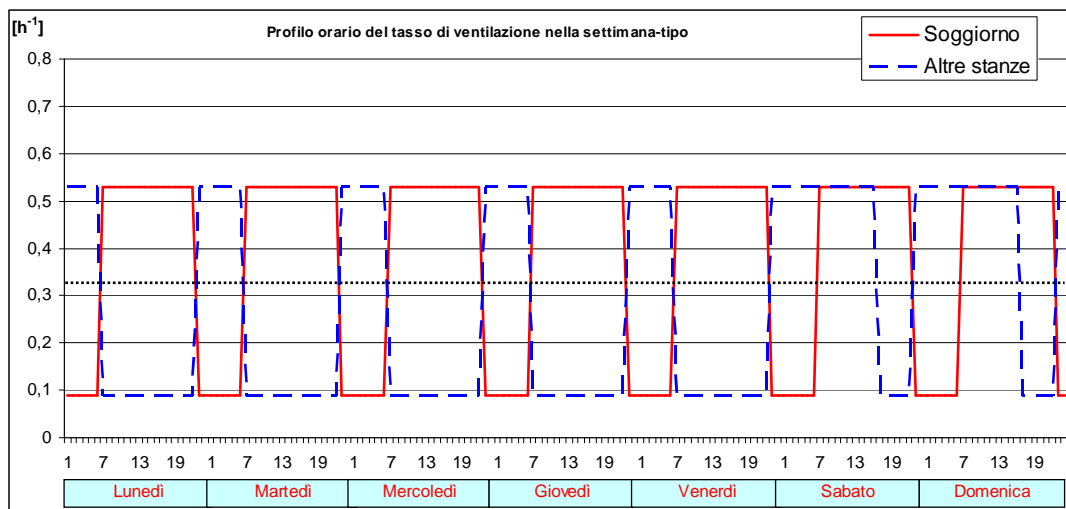


Figura 3.9 Profilo orario del tasso di ventilazione nella settimana-tipo, suddiviso per soggiorno/cucina e altre stanze dell'edificio residenziale oggetto di studio. Il grafico è ottenuto a partire dai valori riportati in Tabella 3.3.

Il valore medio mensile del tasso di ricambio d'aria dell'edificio ricavato a partire dalla Tabella 3.3 è pari a $0,32 \text{ h}^{-1}$ e trova corrispondenza anche nel valore di riferimento riportato nella specifica tecnica UNI/TS 11300-1 – ossia $0,30 \text{ h}^{-1}$ – utilizzato per l'effettuazione di valutazioni energetiche di tipo “standard” (considerando un'utenza convenzionale) in relazione alla ventilazione naturale di edifici residenziali.

3.1.2. Edificio ad uso uffici

Dati generali e dati geometrici

L'edificio ad uso uffici è un edificio multipiano; tuttavia, ai fini dell'analisi si considera unicamente un piano-tipo (chiamato in seguito "edificio" per comodità). Si riporta in Figura 3.10 il modello tridimensionale del piano ad uso uffici, sviluppato mediante il software *DesignBuilder*. Il piano-tipo è compreso tra due piani, perciò il soffitto ed il pavimento del piano in esame sono considerati adiabatici. I lati maggiori del piano hanno esposizione nord-sud. In Tabella 3.4 sono elencati i principali dati tipologico-dimensionali.

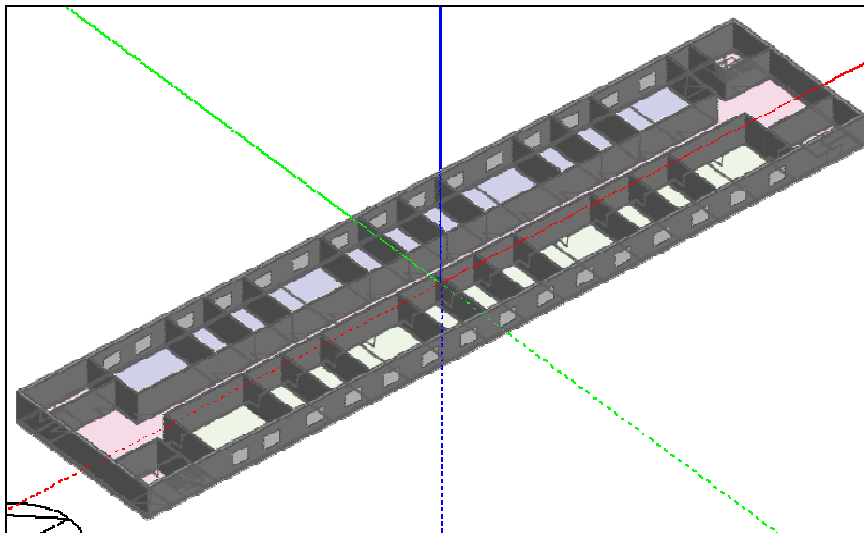


Figura 3.10 Immagine del piano ad uso uffici oggetto di studio. La modellazione geometrica dell'edificio è stata realizzata con il software *DesignBuilder*.

Tabella 3.4 Principali dati tipologico-dimensionali del piano ad uso uffici.

A_f [m ²]	928	V_n [m ³]	2784	A_{env}/V_g [m ⁻¹]	0,17
A_{env} [m ²]	539	V_g [m ³]	3228	A_{env}/A_f	0,58

Il piano è costituito da 22 uffici corrispondenti ad una superficie di pavimento complessiva di 589 m² e da servizi (scale, corridoi e servizi igienici) caratterizzati da una superficie di pavimento complessiva di 339 m². Tutto il piano è climatizzato ed è modellato in tre zone termiche distinte (uffici lato nord, uffici lato sud e servizi). L'edificio non presenta superfici confinanti con altri edifici; inoltre, non esistono edifici od ostacoli esterni nel contesto che possano ombreggiare le superfici esterne dell'edificio.

Dati relativi all'uso: apporti interni di calore

Il valore globale degli apporti termici interni è ricavato dalla normativa tecnica con riferimento ad un'utenza convenzionale. Il valore medio mensile degli apporti interni viene prima determinato

secondo il prospetto G.12 (cfr. Figura 3.2) della norma UNI EN ISO 13790 per la tipologia “Offices” e l’equazione G.7 (cfr. Figura 3.3) della stessa norma; successivamente questo valore è confrontato con il valore medio mensile ricavato dal prospetto G.9. (cfr. Figura 3.11) della UNI EN ISO 13790 e dall’identico prospetto 10 (cfr. Figura 3.12) della specifica tecnica UNI/TS 11300-1, che riportano il profilo giornaliero dei flussi termici interni.

Table G.9 — Heat flow rate from occupants and appliances; default values in the absence of national values; detailed values for offices			
Days	Hours	Offices	
		Office spaces (60 % of conditioned floor area) $(\phi_{\text{int, Oc}} + \phi_{\text{int, A}})/A_f$ W/m ²	Other rooms, lobbies, corridors (40 % of conditioned floor area) $(\phi_{\text{int, Oc}} + \phi_{\text{int, A}})/A_f$ W/m ²
Monday to Friday	07.00 to 17.00	20,0	8,0
	17.00 to 23.00	2,0	1,0
	23.00 to 07.00	2,0	1,0
	Average	9,50	3,92
Saturday and Sunday	07.00 to 17.00	2,0	1,0
	17.00 to 23.00	2,0	1,0
	23.00 to 07.00	2,0	1,0
	Average	2,0	1,0
Average		7,4	3,1

$(\phi_{\text{int, Oc}} + \phi_{\text{int, A}})$ is the heat flow rate from persons and appliances, expressed in watts.
 A_f is the conditioned floor area, defined in 6.4, expressed in square metres.

Figura 3.11 Prospetto G.9 della norma tecnica UNI EN ISO 13790 con il profilo giornaliero e settimanale degli apporti interni, per tipo di ambiente ad uso ufficio, utilizzato per l’analisi.

prospetto 10 Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici adibiti ad uffici)			
Giorni	Ore	Ambienti ufficio (60% della superficie utile di pavimento) $(\phi_{\text{int, Oc}} + \phi_{\text{int, A}})/A_f$ W/m ²	Altre stanze, atri, corridoi (40% della superficie utile di pavimento) $(\phi_{\text{int, Oc}} + \phi_{\text{int, A}})/A_f$ W/m ²
Lunedì - Venerdì	07.00 - 17.00	20,0	8,0
	17.00 - 23.00	2,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	1,0
	Media	9,50	3,92
Sabato - Domenica	07.00 - 17.00	2,0	1,0
	17.00 - 23.00	2,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	1,0
	Media	2,0	1,0
Media		7,4	3,1

$(\phi_{\text{int, Oc}} + \phi_{\text{int, A}})$ è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;
 A_f è la superficie utile di pavimento.

Figura 3.12 Prospetto 10 della specifica tecnica UNI/TS 11300-1 con il profilo giornaliero e settimanale degli apporti interni, per tipo di ambiente ad uso ufficio (i valori sono gli stessi del prospetto G.9 della UNI EN ISO 13790, in Figura 3.11), utilizzato per l’analisi.

Considerando che gli uffici rappresentano il 64% e i servizi il 36% dell’intera superficie di pavimento climatizzata, il valore medio mensile ricavato da questi prospetti è pari a 5,6 W/m². Si tratta di un dato comparabile sia a quello derivante dall’applicazione dell’equazione G.7 e dal

prospetto G.12 della UNI EN ISO 13790 ($6,05 \text{ W/m}^2$) sia a quello fornito dalla UNI/TS 11300-1 per l'effettuazione di valutazioni energetiche con dati di ingresso riferiti ad un'utenza convenzionale (cfr. Figura 3.13).

prospetto 8

Dati convenzionali relativi all'utenza		
Categoria di edificio	Destinazione d'uso	Apporti medi globali
		W/m^2
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari	6
E.2	Edifici adibiti a uffici e assimilabili	6
E.3	Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili	8
E.4 (1)	Cinema e teatri, sale di riunione per congressi	8
E.4 (2)	Mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto	8
E.4 (3)	Bar, ristoranti, sale da ballo	10
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili	8
E.6 (1)	Piscine, saune e assimilabili	10
E.6 (2)	Palestre e assimilabili	5
E.6 (3)	Servizi di supporto alle attività sportive	4
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	4
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili	6

Figura 3.13 Prospetto 8 della specifica tecnica UNI/TS 11300-1 con gli apporti medi globali di edifici ad uso non residenziale da utilizzare per le valutazioni energetiche di tipo “standard” (per gli uffici il valore è 6 W/m^2).

All'interno dello studio si è utilizzato il profilo degli apporti interni secondo il prospetto G.9 della UNI EN ISO 13790 e il prospetto 10 della UNI/TS 11300-1. In Figura 3.14 si riporta il relativo grafico del profilo orario degli apporti interni per una settimana-tipo del piano ad uso uffici oggetto di studio. Con la linea tratteggiata è indicato il valore medio.

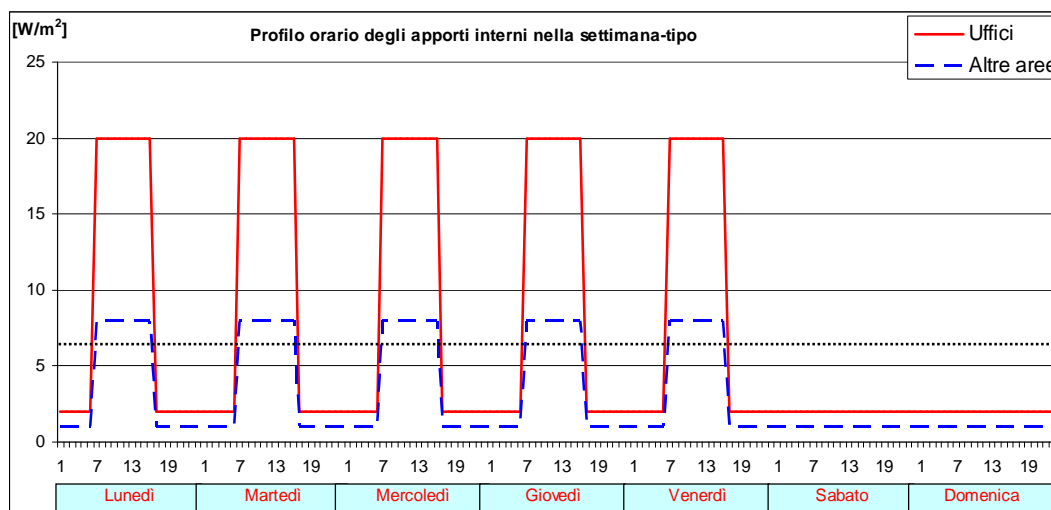


Figura 3.14 Profilo orario degli apporti interni globali nella settimana-tipo, suddiviso in uffici ed altre aree del piano-tipo oggetto di studio. Il grafico è ottenuto a partire dai valori riportati in Figura 3.11 e in Figura 3.12.

Dati relativi all'uso: ventilazione

Per la determinazione del livello di ventilazione del caso studio si fa riferimento alla norma tecnica UNI EN 15251, come avvenuto per l'edificio residenziale. Negli edifici non residenziali la qualità dell'aria interna dipende da molti parametri, come il numero di persone e il tempo di occupazione, le emissioni derivanti dalle attività, le emissioni derivanti dalle apparecchiature, dai materiali edilizi e dagli impianti (che costituiscono i “componenti edilizi”). La norma tecnica specifica tre modalità per determinare il tasso di ventilazione richiesto durante le ore di occupazione:

- calcolare la ventilazione richiesta per gli occupanti e aggiungere la quota di ventilazione che serve a diluire gli inquinanti prodotti dai componenti edilizi;
- calcolare il tasso di ventilazione richiesto per persona o per unità di area di pavimento;
- calcolare il tasso di ventilazione richiesto attraverso un bilancio di massa ed i requisiti richiesti per il livello di CO₂.

In quest'analisi si prendono in considerazione i primi due metodi. Nel primo caso la portata di aria esterna è calcolata sommando la portata richiesta per gli occupanti e la portata richiesta per diluire gli inquinanti prodotti dai componenti edilizi (cfr. prospetto B.2 in Figura 3.15: categoria II di “Single office” e “low-polluted building”).

Table B.2 — Examples of recommended ventilation rates for non-residential buildings with default occupant density for three categories of pollution from building itself. If smoking is allowed the last column gives the additional required ventilation rate.										
Type of building or space	Category	Floor area m ² /person	q_p	q_B	q_{tot}	q_B	q_{tot}	q_B	q_{tot}	Add when smoking
			l/s, m ² for occupancy	l/s, m ² for very low-polluted building	l/s, m ² for low-polluted building	l/s, m ² for low-polluted building	l/s, m ² for non-low polluted building	l/s, m ² for non-low polluted building	l/s, m ² for non-low polluted building	
Single office	I	10	1,0	0,5	1,5	1,0	2,0	2,0	3,0	0,7
	II	10	0,7	0,3	1,0	0,7	1,4	1,4	2,1	0,5
	III	10	0,4	0,2	0,6	0,4	0,8	0,8	1,2	0,3
Land-scaped office	I	15	0,7	0,5	1,2	1,0	1,7	2,0	2,7	0,7
	II	15	0,5	0,3	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9	0,5
	III	15	0,3	0,2	0,5	0,4	0,7	0,8	1,1	0,3
Conference room	I	2	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0	5,0
	II	2	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9	3,6
	III	2	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8	2,0
Auditorium	I	0,75	15	0,5	15,5	1,0	16	2,0	17	
	II	0,75	10,5	0,3	10,8	0,7	11,2	1,4	11,9	
	III	0,75	6,0	0,2	6,2	0,4	6,4	0,8	6,8	

Figura 3.15 Prospetto B.2 della norma tecnica UNI EN 15251 con l'indicazione della portata di ventilazione richiesta per edifici non residenziali, in funzione della classe di occupazione e del livello di inquinanti.

Il secondo metodo si basa sul tasso di ventilazione per persona o per unità di area di pavimento:

i valori per persona tengono conto della presenza delle sole persone come fonti di inquinanti; i valori per superficie utile tengono conto dei materiali come sole fonti di inquinanti (cfr. prospetto B.3 in Figura 3.16: categoria II e “*low-polluting building*”).

Table B.3 - Examples of recommended ventilation rates for non-residential buildings for three categories of pollution from building itself. Rates are given per person or per m ² floor area				
Category	Airflow per person l/s/pers	Airflow for building emissions pollutions (l/s/m ²)		
		Very low polluting building	Low polluting building	Non low polluting building
I	10	0,5	1	2
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4	0,2	0,4	0,8

Figura 3.16 Prospetto B.3 della norma tecnica UNI EN 15251 con l'indicazione della portata di ventilazione richiesta per edifici non residenziali, riferita separatamente agli occupanti e ai componenti edilizi.

La norma tecnica lascia aperta la possibilità di considerare quale tasso di ventilazione utilizzare nei calcoli energetici, purché venga scelto tra i seguenti:

- il valore risultante dalla somma dei valori richiesti per l'occupazione e per i componenti edilizi;
- il valore più elevato dei due valori richiesti separatamente per l'occupazione e per i componenti edilizi;
- un valore compreso tra la somma dei due ed il più elevato.

Ai fini dell'analisi si è scelto di utilizzare la somma dei due per la zona uffici e il solo valore relativo ai componenti edilizi nelle zone di servizio.

Durante i periodi di non occupazione deve essere comunque garantito un minimo livello di ventilazione, variabile, secondo la UNI EN 15251, tra 0,1 e 0,2 l/(s·m²). Nell'analisi si è considerato come livello minimo di ventilazione nelle ore di non occupazione il valore più alto compreso nell'intervallo fornito, ossia 0,2 l/(s·m²).

Le portate d'aria esterna ricavate per le ore di occupazione e le ore di non occupazione sono convertite per comodità in tassi di ricambio d'aria. In Tabella 3.5 è riportato il profilo giornaliero e settimanale del tasso di ricambio d'aria per ambiente (uffici e altre zone), modellato sullo schema già utilizzato per gli apporti interni (cfr. Figura 3.11 e Figura 3.12), secondo il calcolo effettuato per le ore di occupazione (valore più alto per ciascuna delle due zone) e le ore di non occupazione (valore più basso).

In Figura 3.17 è delineato il profilo orario del tasso di ricambio d'aria per la settimana-tipo del piano ad uso uffici oggetto di studio; il grafico è ricavato dai valori della Tabella 3.5. Con la linea

tratteggiata è indicato il valore medio.

Tabella 3.5 Profilo giornaliero e settimanale del tasso di ricambio d'aria in h^{-1} , per tipo di locale interno al piano ad uso uffici, utilizzato per l'analisi.

GIORNI	ORE	UFFICI (64% dell'area climatizzata) [h^{-1}]	ALTRE AREE (36% dell'area climatizzata) [h^{-1}]
Lunedì - Venerdì	07:00 - 17:00	1,68	0,84
	17:00 - 23:00	0,24	0,24
	23:00 - 07:00	0,24	0,24
	Media	0,84	0,49
Sabato - Domenica	07:00 - 17:00	0,24	0,24
	17:00 - 23:00	0,24	0,24
	23:00 - 07:00	0,24	0,24
	Media	0,24	0,24
Media		0,67	0,42

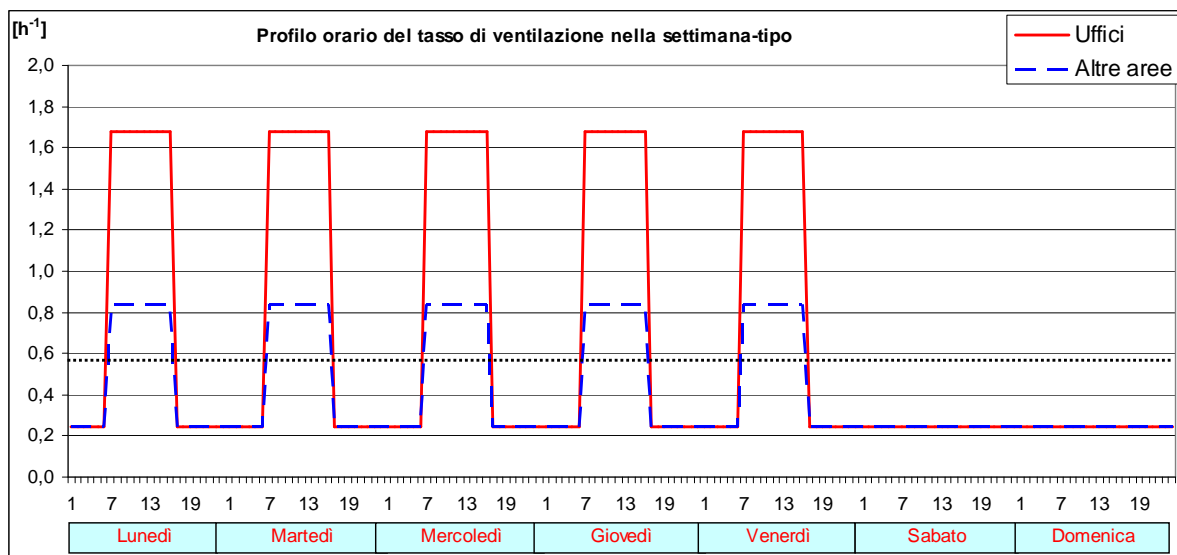


Figura 3.17 Profilo orario del tasso di ventilazione nella settimana-tipo, suddiviso per uffici e altre aree (servizi) del piano ad uso uffici oggetto di studio. Il grafico è ottenuto a partire dai valori riportati in Tabella 3.5.

Il valore medio mensile del tasso di ricambio d'aria del caso studio, ricavato a partire dalla Tabella 3.5, è pari a $0,58 \text{ h}^{-1}$ ed è superiore al valore di riferimento richiamato dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-1 per l'effettuazione di valutazioni energetiche di tipo "standard" (considerando un'utenza convenzionale) in relazione alla ventilazione naturale di edifici non residenziali. Questo valore è pari a $0,48 \text{ h}^{-1}$ e corrisponde al tasso di ventilazione fornito dalla norma tecnica UNI 10339 considerando il 60% dell'indice di affollamento riportato nella norma stessa.

3.2. I parametri oggetto dell'analisi

Fissati separatamente, per ciascun caso studio, i parametri relativi al contesto climatico, alla geometria e all'uso dell'edificio – in termini di profilo degli apporti interni e profilo di ventilazione – si descrivono ora i sei parametri oggetto di variazione. Per ciascuno di essi vengono individuati dei valori discreti, o delle “designazioni”, che nel loro insieme possono essere considerati rappresentativi per descrivere tutta la possibile realtà costruita.

3.2.1. L'estensione della superficie trasparente

Il primo parametro è l'estensione della superficie trasparente: essa è espressa attraverso il rapporto tra la superficie trasparente stessa e la superficie disperdente complessiva ($A_w/A_{env,oi}$), dove con $A_{env,oi}$ si indica la superficie disperdente misurata considerando le dimensioni interne lorde dell'edificio. Per ciascuno dei due casi studio sono individuati tre diversi livelli del rapporto $A_w/A_{env,oi}$: il primo livello corrisponde ad un valore prossimo al minimo richiesto per legge (es. secondo il rapporto aero-illuminante), il terzo livello corrisponde ad un edificio altamente vetrato, il secondo è intermedio tra gli altri due. I tre livelli di ampiezza della superficie trasparente, rispettivamente per l'edificio ad uso residenziale e per l'edificio ad uso uffici, sono riportati in Tabella 3.6.

Tabella 3.6 Valori assunti dal parametro $A_w/A_{env,oi}$ per i due casi studio.

$A_w/A_{env,oi}$	EDIFICIO AD USO RESIDENZIALE (con $A_{env,oi}$ pari a 550 m ²)	EDIFICIO AD USO UFFICI (con $A_{env,oi}$ pari a 434 m ²)
	0,07	0,12
	0,14	0,17
	0,27	0,28

3.2.2. I parametri termici e solari della superficie trasparente

Il parametro termico della superficie trasparente è rappresentato dalla trasmittanza termica dell'involucro trasparente, legata ai valori di trasmittanza termica dei suoi componenti (vetro, U_{gl} , e telaio, U_F). I tre livelli di trasmittanza termica assunti dai componenti vetrati nei due casi studio si riferiscono a tre diverse tipologie di vetro, ovvero vetro singolo, vetro-camera e vetro triplo, e sono indicati, insieme ai rispettivi valori di trasmittanza di energia solare totale, in Tabella 3.7.

Tabella 3.7 Valori assunti dalla trasmittanza termica e dalla trasmittanza di energia solare totale delle vetrate in funzione della tipologia, con i corrispondenti valori di trasmittanza termica dei telai (per entrambi i casi studio).

Tipologia	U_{gl} [W/(m ² K)]	$g_{gl,n}$ [-]	U_F [W/(m ² K)]
VETRO SINGOLO con telaio in legno (5 mm)	5,7	0,8	2,3
VETRO-CAMERA con telaio in legno (7 mm)	2,5	0,7	1,8
VETRO TRIPLO con telaio in legno/alluminio	0,7	0,6	0,9

Il parametro solare della superficie trasparente viene identificato principalmente con la presenza/assenza (*ON/OFF*) della schermatura solare mobile posta all'esterno, che determina il valore della trasmittanza di energia solare totale del sistema vetrata-schermatura. Dovendo poter quantificare questo aspetto, verrà successivamente individuato un parametro "semi-empirico" che renderà possibile l'effettuazione dell'analisi di sensibilità sulle variabili individuate.

L'attivazione delle schermature solari

Quando la schermatura solare è prevista (*ON*), la sua attivazione è legata al sussistere di una data condizione di irraggiamento sulla superficie del vetro. In particolare, si considera che la schermatura si attivi in presenza di un valore di riferimento (set-point) di irradianza solare; questo valore è stato ricavato dalla letteratura in seguito ad un'approfondita ricerca bibliografica.

Gli studi relativi all'utilizzo di sistemi di schermatura solare mobile negli edifici (soprattutto in edifici per uffici) hanno come oggetto principale l'analisi della prestazione di questi sistemi in vista del raggiungimento sia di un elevato comfort visivo in ambiente sia di una riduzione del consumo per illuminazione artificiale, ottenuto mediante l'ottimizzazione della penetrazione della luce naturale in ambiente; si tratta quindi di studi che considerano soprattutto il tema illuminotecnico, mentre l'aspetto termo-energetico è in genere secondario. Tuttavia, il controllo dell'ingresso della radiazione solare in ambiente, finalizzato alla riduzione dell'abbagliamento visivo, ha risvolti anche sul comportamento termico dell'edificio, soprattutto in estate.

Lo studio principale su questo tema è quello effettuato di Inoue *et al.* (1988). Attraverso indagini sperimentali, i ricercatori individuano come valore di soglia, al di sotto del quale la schermatura non è utilizzata, 50-60 W/m² di irradianza solare diretta, misurata sulla superficie interna della vetrata; al di sopra di 60 W/m² la schermatura è utilizzata in funzione della penetrazione della radiazione solare diretta in ambiente. Inoltre, il valore dell'irradianza solare diretta, in relazione al quale la schermatura solare presenta il livello di funzionamento più elevato, risulta essere inferiore a 250 W/m².

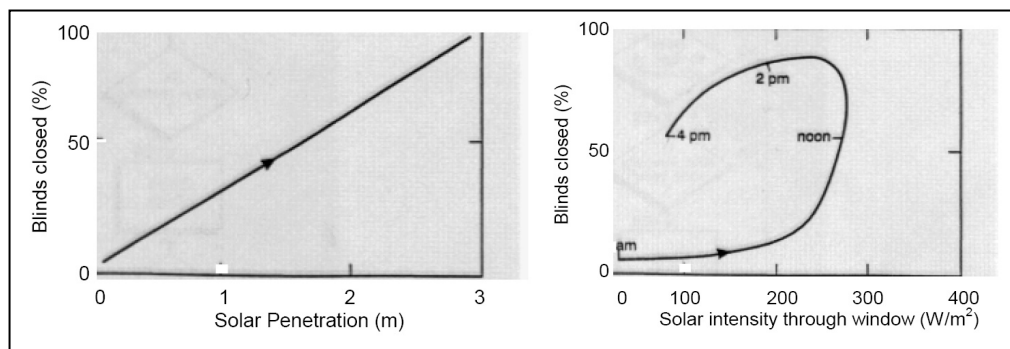


Figura 3.18 Grafici tratti da Newsham, 1994 [Fig. 2 "Measured relationship between percentage of blind closed and solar penetration and intensity, for a SSW facing office building in Japan"].

I risultati dell'indagine condotta da Inoue *et al.* (1988) sono confermati da Newsham (1994), il quale identifica nuovamente con 60 W/m^2 il valore minimo di riferimento per l'attivazione delle schermature solari e con 233 W/m^2 il valore di soglia massima. Un esempio dei risultati della sua analisi è riportato in Figura 3.18.

Le prove sperimentali condotte da Reinhart *et al.* (2002, 2003 e 2004) applicano i valori risultanti dagli studi di Inoue *et al.* (1988): per attivare le schermature installate viene utilizzato come valore di riferimento $50\text{-}60 \text{ W/m}^2$ di radiazione solare diretta.

Gli studi più recenti, di Leslie *et al.* (2005) e di Inkarojrit (2006), confermano gli studi precedenti e li applicano nelle loro indagini sperimentali. In particolare, Leslie *et al.* (2005) prevede che la schermatura solare risulti attiva ogni qualvolta la radiazione solare diretta colpisce la finestra; lo studio di Inkarojrit (2006) ha come obiettivo lo sviluppo di un modello predittivo del controllo delle schermature solari, che possa essere utilizzato nei programmi di simulazione numerica. A tal scopo viene utilizzato come elemento di riferimento la radiazione solare trasmessa attraverso la finestra. Dallo svolgimento di indagini, mediante questionari e misure in campo, l'autore dello studio evince che la probabilità di chiusura delle schermature a veneziana è funzione dell'intensità della radiazione solare verticale, secondo quanto indicato nel grafico di Figura 3.19. Si osserva come, in presenza del valore di irradianza solare di 60 W/m^2 , dato di riferimento utilizzato nella maggior parte degli studi sul tema, la probabilità di chiusura delle schermature solari sia superiore all'80%.

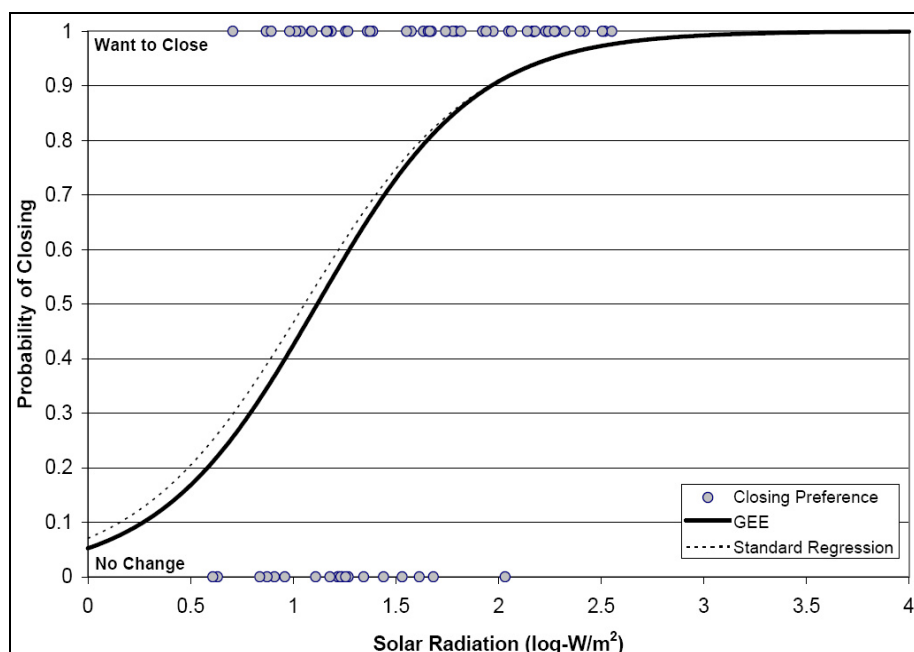


Figura 3.19 Grafico tratto da Inkarojrit, 2006 [Fig. 5 Model L2, logistic model of window blind closing events as a function of vertical solar radiation at the window (*SOL*; expressed in log scale)].

Nell'analisi parametrica effettuata, in riferimento all'attivazione delle schermature solari si è utilizzato perciò, come valore di set-point, 60 W/m^2 dell'irradianza solare diretta misurata sulla

superficie interna del vetro. Anche se alcuni studi dimostrano che questo valore rappresenta la soglia minima di attivazione, tuttavia, considerando che l'analisi è effettuata per la stagione estiva (mese di luglio) e che vengono indagati aspetti termici e non illuminotecnici, è fissato un vincolo più restrittivo e questo dato è assunto come soglia oltre la quale si verifica il 100% di probabilità di chiusura delle schermature solari. La scelta è dettata anche dalle limitazioni di modellazione del programma di simulazione numerica con il quale è effettuata l'analisi: in *EnergyPlus*, infatti, non è prevista la possibilità di considerare in maniera precisa una percentuale di probabilità di chiusura delle schermature. Inoltre, poiché in *EnergyPlus* occorre inserire come set-point di attivazione un valore riferito alla radiazione solare globale (diretta e diffusa) che incide sulla superficie esterna della vetrata, il valore di irradianza solare di 60 W/m^2 è stato convertito in un valore di irradianza solare globale sulla superficie esterna del serramento ricavato, per ogni serramento dell'edificio, come:

$$I_{\text{tot,out,EnergyPlus}} = \frac{I_{\text{dir,in,set-point}}}{\tau_{\text{sol}}} \cdot \frac{I_{\text{dir,out}} + I_{\text{dif,out}}}{I_{\text{dir,out}}} \quad (3.1)$$

dove, $I_{\text{tot,out,EnergyPlus}}$ è il valore di set-point di attivazione della schermatura solare introdotto in *EnergyPlus*, riferito all'irradianza solare globale (diretta e diffusa) sulla superficie esterna del vetro; $I_{\text{dir,in,set-point}}$ è il valore di attivazione di riferimento tratto dalla letteratura (60 W/m^2) riferito all'irradianza solare diretta misurata sulla superficie interna del vetro; τ_{sol} è il coefficiente di trasmissione solare del vetro ed è assunto pari a 0,78 per “vetro singolo”, 0,60 per “vetro-camera”, 0,33 per “vetro triplo” (cfr. Tabella 3.7); $I_{\text{dir,out}}$ è l'irradianza solare diretta sulla superficie esterna del vetro; $I_{\text{dif,out}}$ è l'irradianza solare diffusa sulla superficie esterna del vetro.

3.2.3. L'assorbimento solare della superficie esterna dell'involucro opaco

Il quarto parametro soggetto a variazione è relativo alle proprietà solari della superficie esterna dell'involucro opaco ed è rappresentato dal coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna opaca. Si considerano per l'analisi tre valori del coefficiente di assorbimento solare, che corrispondono a tre diversi livelli di colorazione della superficie esterna dell'involucro opaco degli edifici oggetto di studio, come indicato in Tabella 3.8.

Tabella 3.8 Valori assunti dal coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna dell'involucro opaco in funzione del colore della superficie (per entrambi i casi studio).

Colore	α_{sol}
CHIARO	0,3
MEDIO	0,6
SCURO	0,9

3.2.4. Il livello di isolamento termico dei componenti edilizi opachi

Il quinto parametro considerato è la trasmittanza termica dell'involucro edilizio opaco, che rappresenta il livello di isolamento termico. Per i componenti d'involucro opaco degli edifici in

esame si considerano tre livelli di isolamento termico cui corrispondono tre diversi livelli di trasmittanza termica, elencati in Tabella 3.9. Si consideri che il livello medio – variabile intorno al valore di $0,3 \div 0,4 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ – corrisponde al requisito attuale dalla legislazione nazionale in materia di efficienza energetica in edilizia (cfr. capitolo 1).

Tabella 3.9 Valori di trasmittanza termica dei componenti edilizi opachi in funzione del livello di isolamento termico (per entrambi i casi studio).

<i>Livello di isolamento</i>	<i>U_{op} [W/(m² K)]</i>
<i>BASSO</i>	0,9
<i>MEDIO</i>	0,3
<i>ALTO</i>	0,1

3.2.5. La capacità termica della struttura edilizia

Il sesto parametro preso in considerazione è la capacità termica della struttura edilizia. Si considerano sei diverse tipologie di strutture edilizie, che si differenziano in base alla capacità termica dei componenti opachi attraverso l'utilizzo di materiali edilizi “pesanti” o “leggeri” e attraverso il differente posizionamento del materiale isolante all'interno del componente edilizio opaco, secondo quanto indicato in Tabella 3.10.

Tabella 3.10 Tipologie di strutture edilizie caratterizzate da un diverso livello di capacità termica (per entrambi i casi studio).

<i>Tipologia di struttura</i>	<i>Posizione dell'isolamento</i>
<i>PESANTE</i>	<i>All'esterno</i>
<i>PESANTE</i>	<i>All'interno</i>
<i>PESANTE</i>	<i>Nell'intercapedine</i>
<i>LEGGERA</i>	<i>All'esterno</i>
<i>LEGGERA</i>	<i>All'interno</i>
<i>LEGGERA</i>	<i>Nell'intercapedine</i>

I tre diversi livelli di isolamento termico e i sei diversi livelli di capacità termica individuano diciotto tipologie diverse di struttura edilizia, caratterizzate ciascuna da quattro componenti d'involucro opaco (chiusura verticale, chiusura orizzontale superiore, chiusura orizzontale inferiore su esterno, chiusura orizzontale inferiore su terreno) e da due componenti edilizi interni (partizione verticale e partizione orizzontale). Le strutture, illustrate nelle schede successive da Figura 3.20 a Figura 3.37, sono costituite da componenti a loro volta caratterizzati da materiali differenti, riportati in Tabella 3.11 (per la struttura “pesante”) e in Tabella 3.12 (per la struttura “leggera”). Le resistenze delle intercapedini d'aria sono tratte dalla norma tecnica UNI EN ISO 6946.

La tipologia del materiale utilizzata è puramente indicativa, in quanto, ai fini dell'analisi, risultano significativi i valori assunti dai parametri termo-fisici dei componenti edilizi indicati nelle schede, valori che possono essere conseguiti anche attraverso l'utilizzo di tecnologie differenti da quelle proposte. I parametri che caratterizzano le strutture sono i seguenti:

- trasmittanza termica (U);
- massa frontale (m_s);
- trasmittanza termica periodica (Y_{ie});
- capacità termica areica interna (κ_i);
- capacità termica areica esterna (κ_e).

Tabella 3.11 Elenco dei materiali utilizzati nei componenti edilizi delle strutture “pesanti” presentate nelle schede successive (le proprietà termo fisiche dei materiali sono tratte dalle norme tecniche UNI 10351, UNI 10355).

<i>MATERIALI</i>	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]
Intonaco di malta di calce o calce e cemento	1800	0,90	840
Laterizio pieno	1800	0,72	840
Lana di roccia	70	0,036	1030
Intonaco di calce e gesso	1400	0,70	840
Finitura copertura	1100	0,23	1000
Massetto in cls	1600	0,65	920
Massetto in cls alleggerito	500	0,28	920
Solaio latero-cementizio	1185	0,74	840
Pavimentazione in ceramica	2300	1,00	840
Ghiaia	1700	1,2	840

Tabella 3.12 Elenco dei materiali utilizzati nei componenti edilizi delle strutture “leggere” presentate nelle schede successive (le proprietà termo fisiche dei materiali sono tratte dalle norme tecniche UNI 10351, UNI 10355).

<i>MATERIALI</i>	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]
Lastra in fibrocemento	1150	0,35	840
Laterizio forato	600	0,25	840
Lana di roccia	70	0,036	1030
Cartongesso	900	0,21	840
Finitura copertura	1100	0,23	1000
Massetto in cls alleggerito	800	0,40	920
Massetto in cls alleggerito	500	0,28	920
Solaio in blocchi di polistirene	970	0,27	840
Pavimentazione in legno di abete	450	0,12	2700
Ghiaia	1700	1,2	840

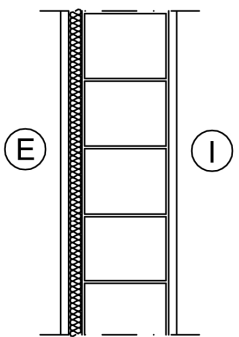
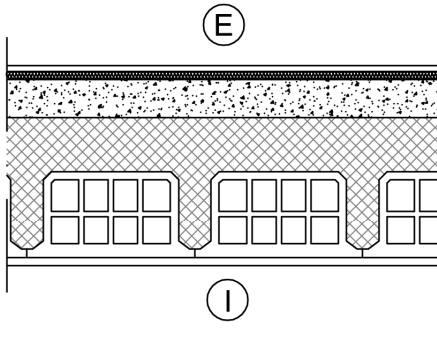
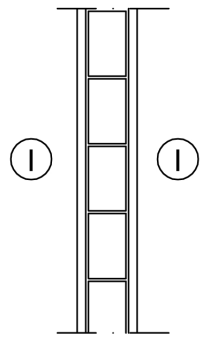
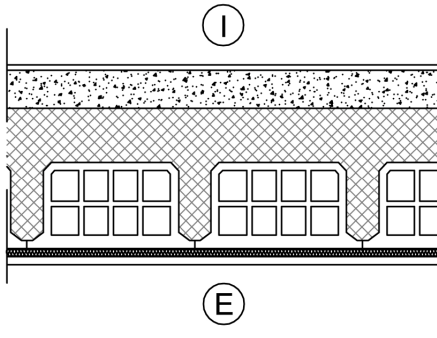
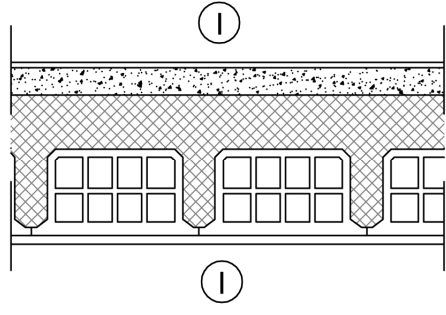
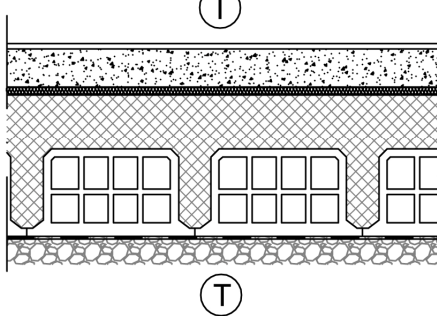
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO ESTERNO ($U = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 21,5 \text{ cm}$ $U = 0,889 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 338 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,262 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 65 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 32,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 37 \text{ cm}$ $U = 0,93 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 453 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,152 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 65,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 29 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 198 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 37 \text{ cm}$ $U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 471 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 54,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 36 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 33,5 \text{ cm}$ $m_s = 438 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 63,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 40,5 \text{ cm}$ $U = 0,88 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 529 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 56,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.20 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato all'esterno e basso livello di isolamento termico.

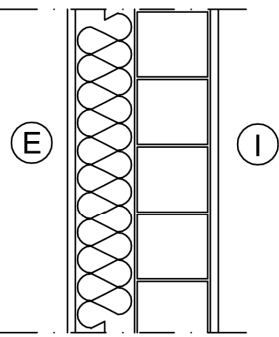
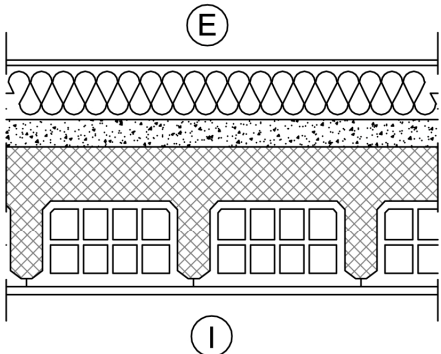
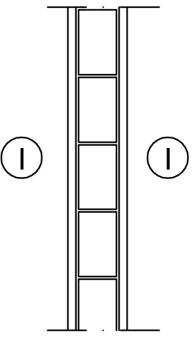
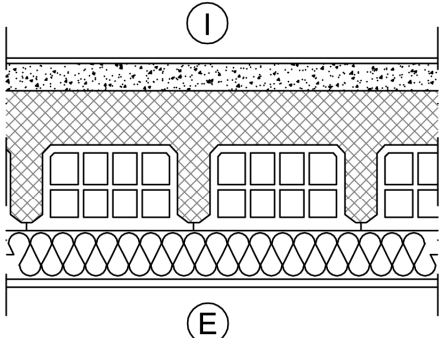
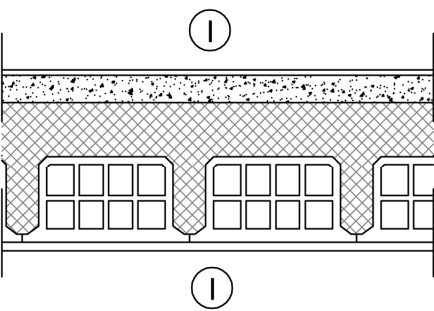
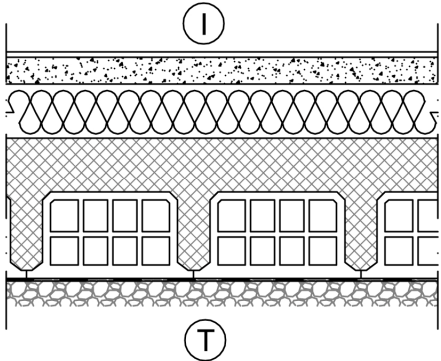
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO ESTERNO ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 28 \text{ cm}$ $U = 0,289 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 308 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,079 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 64,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 26,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 43,5 \text{ cm}$ $U = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 427 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,036 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 63,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 198 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 42,5 \text{ cm}$ $U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 444 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 53,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 25,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 33,5 \text{ cm}$ $m_s = 438 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 63,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 46 \text{ cm}$ $U = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 502 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 55,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.21 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato all’esterno e medio livello di isolamento termico.

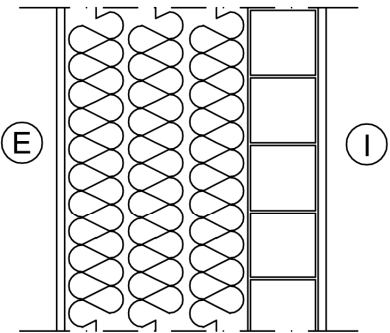
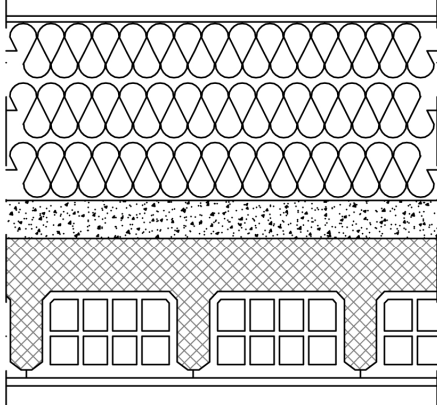
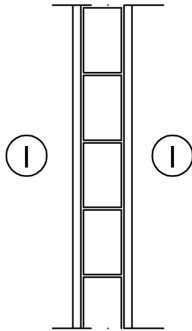
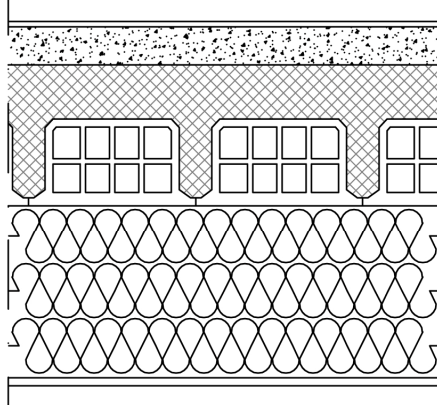
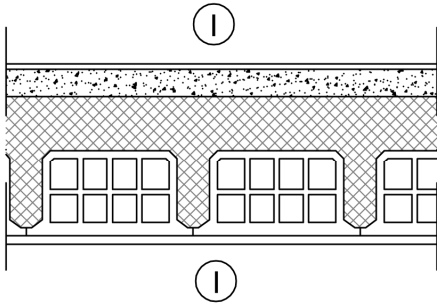
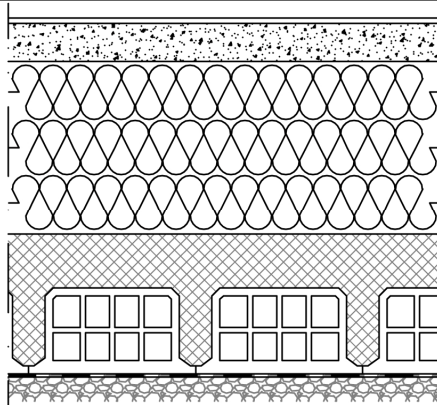
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO ESTERNO ($U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 50 \text{ cm}$ $U = 0,102 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 306 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,013 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 64,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 26,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 68,5 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 475 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,004 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 63 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 15,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 198 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 67,5 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 493 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 53 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 26,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 33,5 \text{ cm}$ $m_s = 438 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 63,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 71 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 551 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 58 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.22 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato all’esterno e alto livello di isolamento termico.

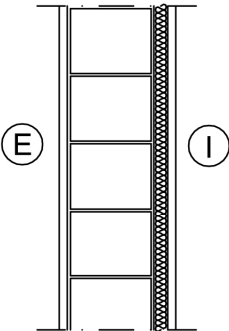
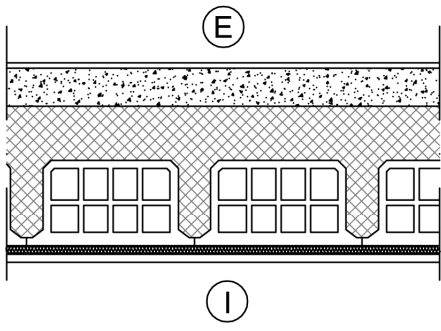
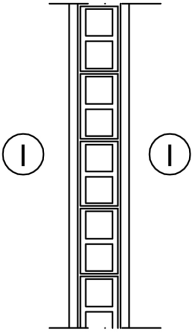
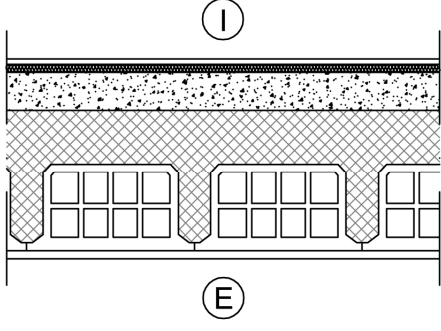
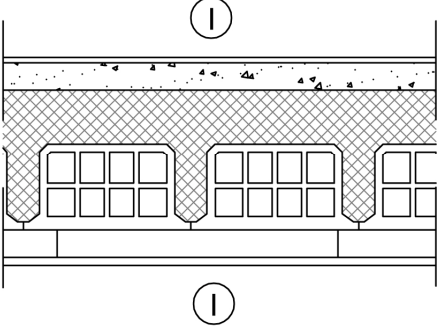
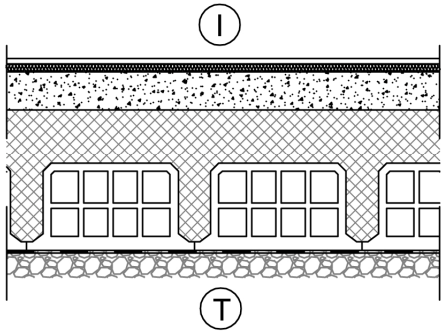
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO INTERNO ($U = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 21,5 \text{ cm}$ $U = 0,889 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 338 \text{ kg/m}^2$ $\gamma_{ie} = 0,377 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 26,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 108,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 37 \text{ cm}$ $U = 0,93 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 453 \text{ kg/m}^2$ $\gamma_{ie} = 0,179 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 30,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 80,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 90 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 34,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 37 \text{ cm}$ $U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 471 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 28,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 89,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 38,5 \text{ cm}$ $m_s = 359 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 36,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 38,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 40,5 \text{ cm}$ $U = 0,88 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 529 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 28,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.23 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato all’interno e basso livello di isolamento termico.

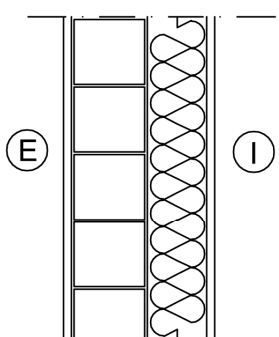
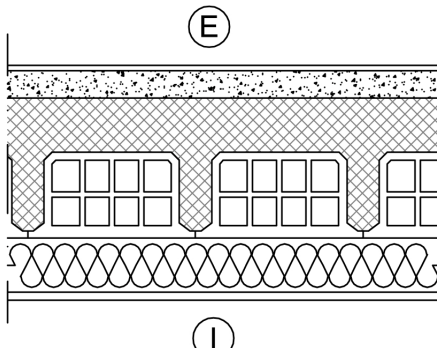
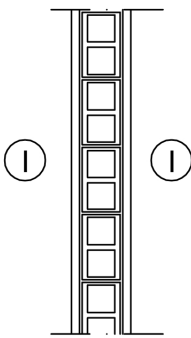
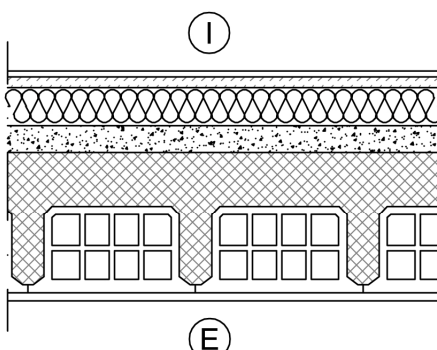
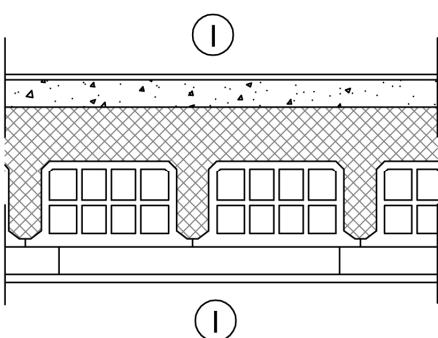
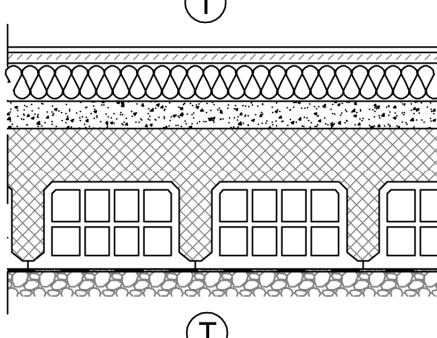
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO INTERNO (U = 0,3 W/m²K)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>s= 28 cm U= 0,289 W/m²K m_s= 308 kg/m²</p> <p>Y_{ie}= 0,124 W/m²K κ_i= 21,3 kJ/m²K κ_e= 109,2 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>s= 43,5 cm U= 0,29 W/m²K m_s= 427 kg/m²</p> <p>Y_{ie}= 0,044 W/m²K κ_i= 20,1 kJ/m²K κ_e= 77,4 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>s= 11 cm m_s= 90 kg/m²</p> <p>κ_i= 34,6 kJ/m²K κ_e= 34,6 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>s= 42,5 cm U= 0,32 W/m²K m_s= 444 kg/m²</p> <p>κ_i= 20,7 kJ/m²K κ_e= 88 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>s= 38,5 cm m_s= 359 kg/m²</p> <p>κ_i= 36,5 kJ/m²K κ_e= 38,9 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>s= 46 cm U= 0,31 W/m²K m_s= 502 kg/m²</p> <p>κ_i= 20,5 kJ/m²K</p> 

Figura 3.24 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato all’interno e medio livello di isolamento termico.

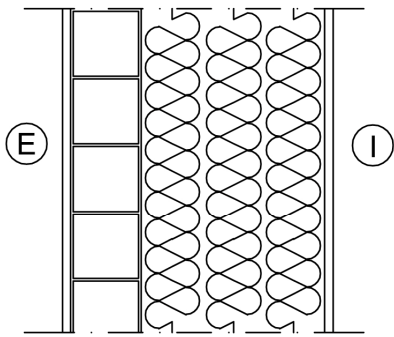
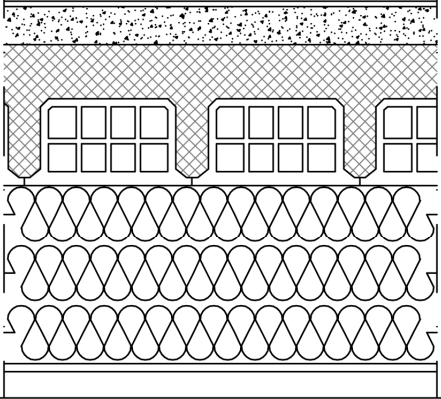
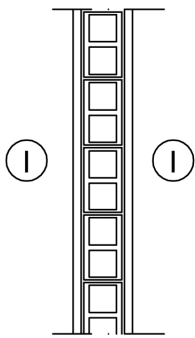
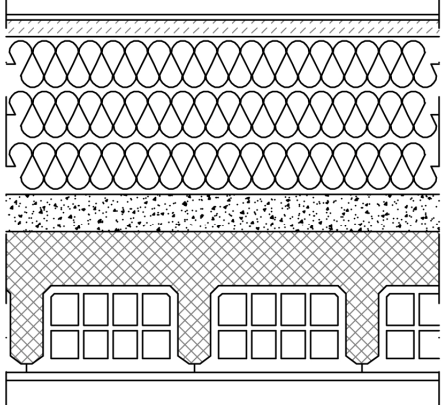
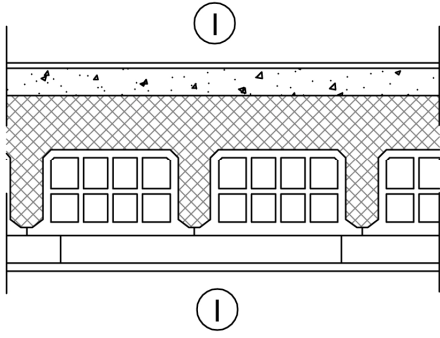
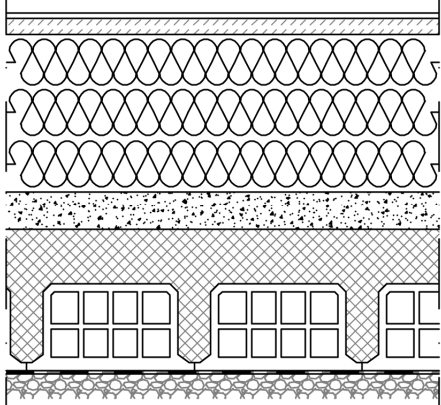
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO INTERNO (U = 0,1 W/m²K)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>s= 50 cm U= 0,102 W/m²K m_s= 306 kg/m² Y_{ie}= 0,02 W/m²K κ_i= 20,8 kJ/m²K κ_e= 109 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>s= 68,5 cm U= 0,10 W/m²K m_s= 475 kg/m² Y_{ie}= 0,005 W/m²K κ_i= 21,2 kJ/m²K κ_e= 77,4 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>s= 11 cm m_s= 90 kg/m² κ_i= 34,6 kJ/m²K κ_e= 34,6 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>s= 67,5 cm U= 0,10 W/m²K m_s= 493 kg/m² κ_i= 21,8 kJ/m²K κ_e= 87,1 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>s= 38,5 cm m_s= 359 kg/m² κ_i= 36,5 kJ/m²K κ_e= 38,9 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>s= 71 cm U= 0,10 W/m²K m_s= 551 kg/m² κ_i= 21,8 kJ/m²K</p> 

Figura 3.25 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato all’interno e alto livello di isolamento termico.

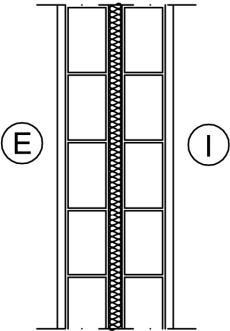
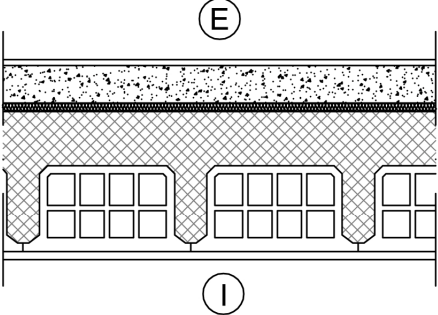
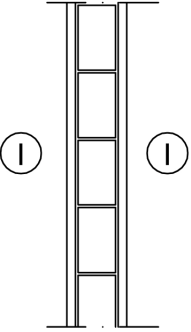
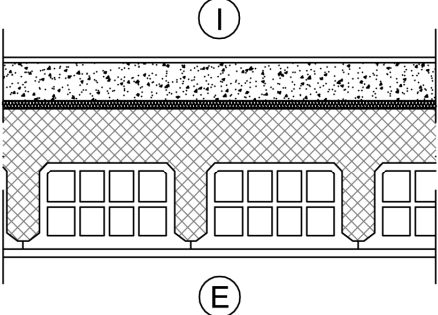
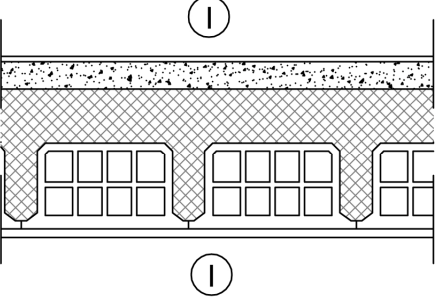
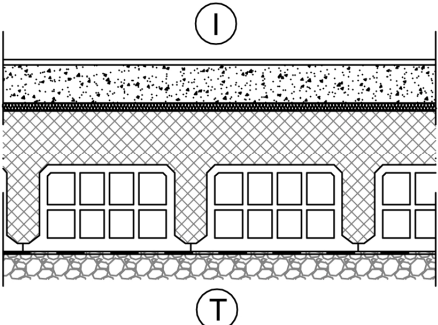
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE ($U = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 21,5 \text{ cm}$ $U = 0,889 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 338 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,391 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 68,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 106,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 37 \text{ cm}$ $U = 0,93 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 453 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 66,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 78,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 198 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 37 \text{ cm}$ $U = 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 471 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 56,8 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 91,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 33,5 \text{ cm}$ $m_s = 438 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 63,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 40,5 \text{ cm}$ $U = 0,88 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 529 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 56,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.26 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato nell’intercapedine e basso livello di isolamento termico.

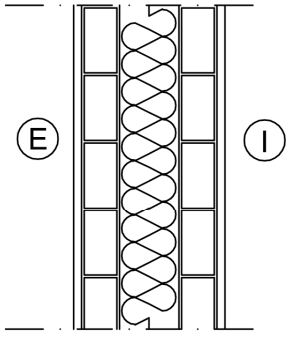
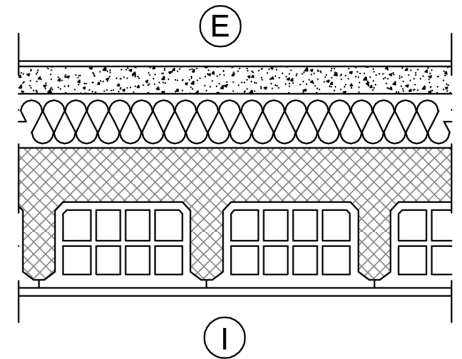
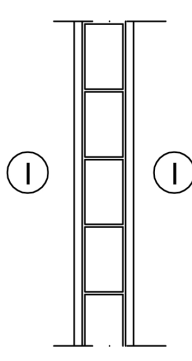
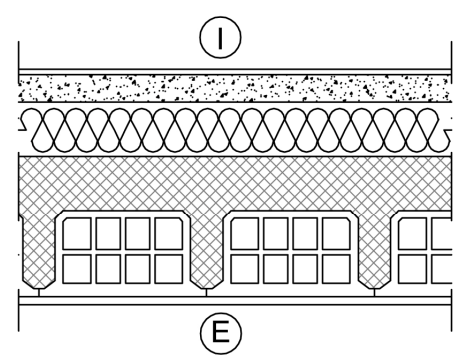
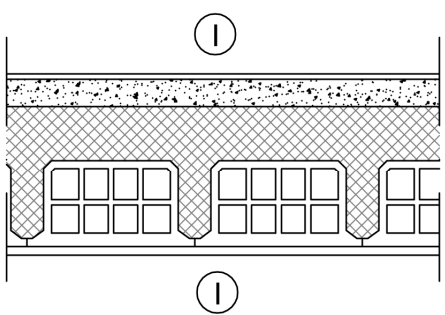
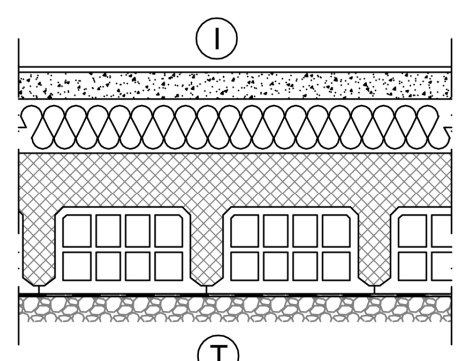
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 28 \text{ cm}$ $U = 0,289 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 308 \text{ kg/m}^2$ $\gamma_{ie} = 0,125 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 103,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 43,5 \text{ cm}$ $U = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 427 \text{ kg/m}^2$ $\gamma_{ie} = 0,049 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 64,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 71,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 198 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 42,5 \text{ cm}$ $U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 444 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 55,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 90 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 33,5 \text{ cm}$ $m_s = 438 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 63,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 46 \text{ cm}$ $U = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 502 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 55,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.27 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato nell’intercapedine e medio livello di isolamento termico.

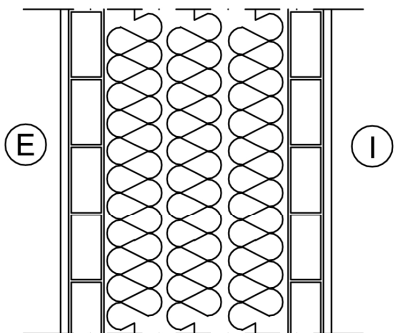
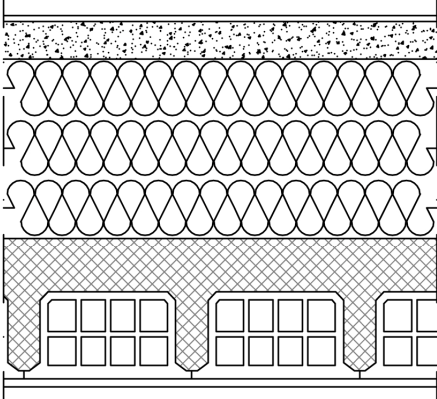
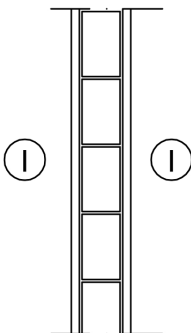
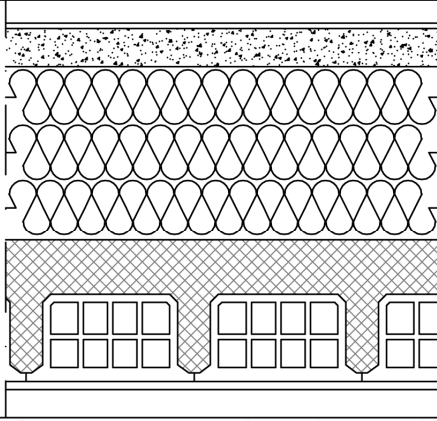
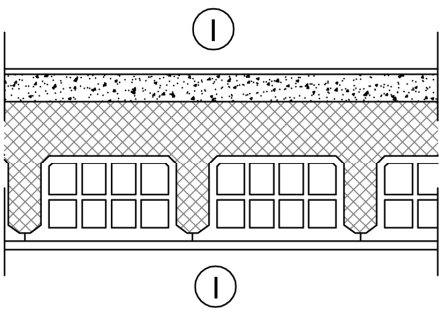
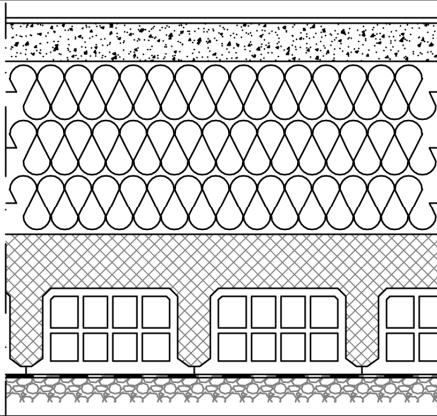
STRUTTURA PESANTE, ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE ($U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 50 \text{ cm}$ $U = 0,102 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 306 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 65,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 99,8 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 68,5 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 475 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,006 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 64 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 82,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 198 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 61 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 67,5 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 493 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 58 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 89,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 33,5 \text{ cm}$ $m_s = 438 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 67,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 63,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 71 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 551 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 58 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.28 Scheda relativa alla struttura edilizia “pesante” con materiale isolante posizionato nell’intercapedine e alto livello di isolamento termico.

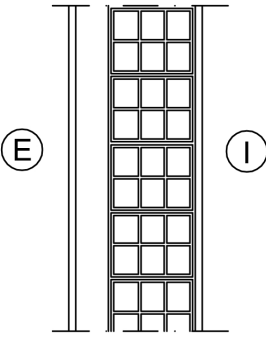
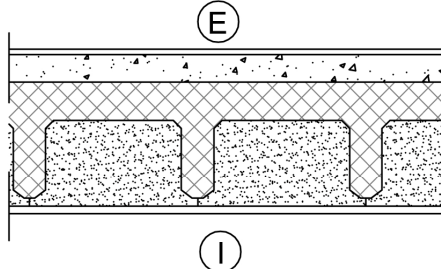
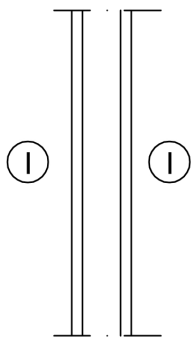
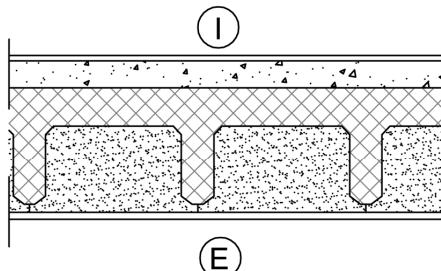
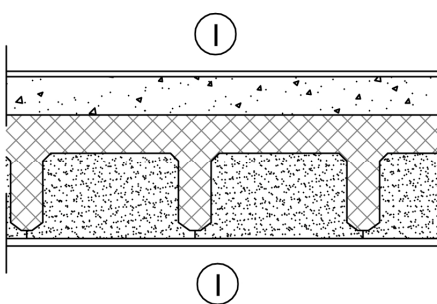
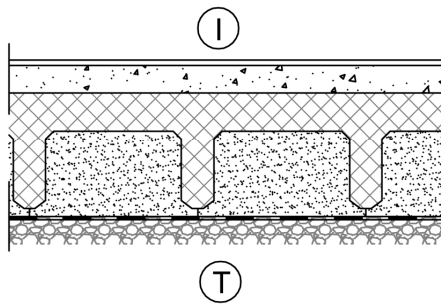
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO ESTERNO ($U = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 24,6 \text{ cm}$ $U = 0,918 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 123 \text{ kg/m}^2$ $\gamma_{ie} = 0,622 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 36,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 36,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 30,3 \text{ cm}$ $U = 0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 286 \text{ kg/m}^2$ $\gamma_{ie} = 0,251 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 43,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 57,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 30,3 \text{ cm}$ $U = 0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 283 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 37,8 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 54,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 32,3 \text{ cm}$ $m_s = 274 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 39,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 34 \text{ cm}$ $U = 0,76 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 353 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 37,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.29 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato all’esterno e basso livello di isolamento termico.

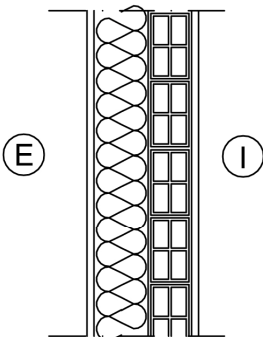
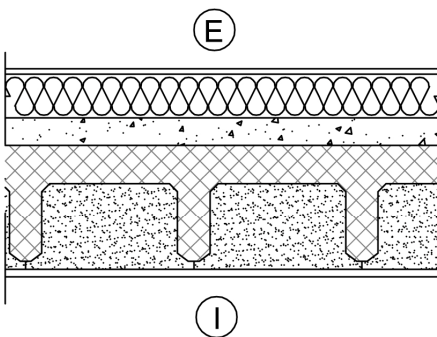
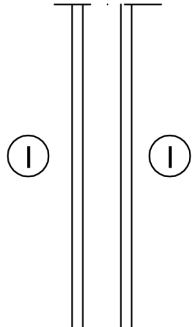
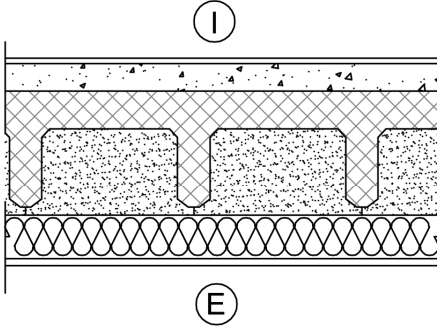
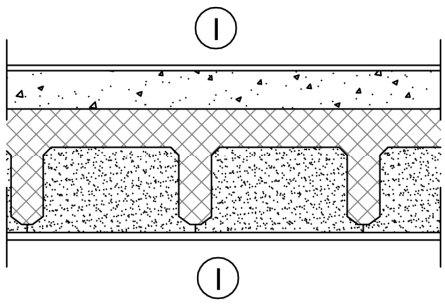
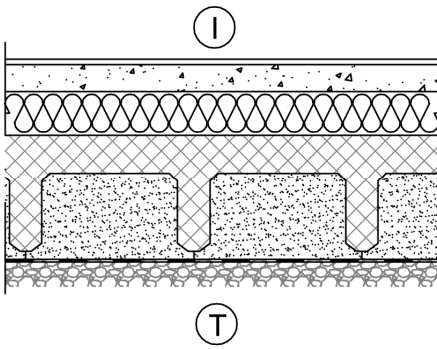
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO ESTERNO ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 20,6 \text{ cm}$ $U = 0,297 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 82 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,215 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 36,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 18,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 38,3 \text{ cm}$ $U = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 291 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,029 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 40,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 38,3 \text{ cm}$ $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 288 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 35,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 15,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 32,3 \text{ cm}$ $m_s = 274 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 39,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 42 \text{ cm}$ $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 358 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.30 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato all’esterno e medio livello di isolamento termico.

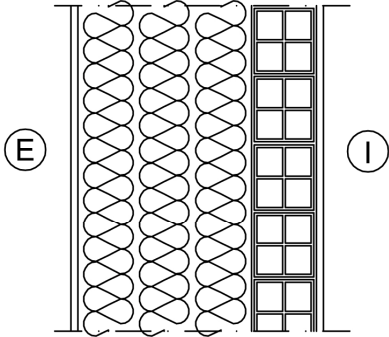
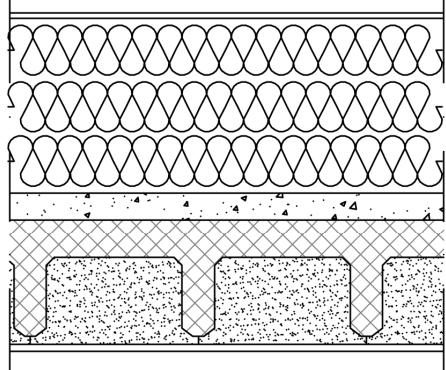
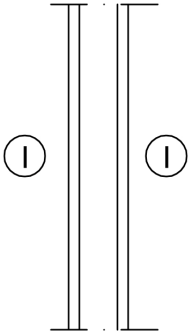
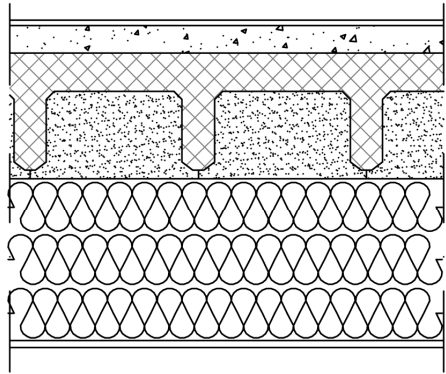
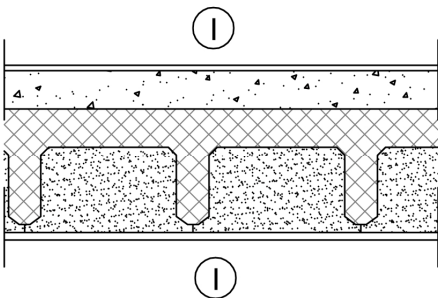
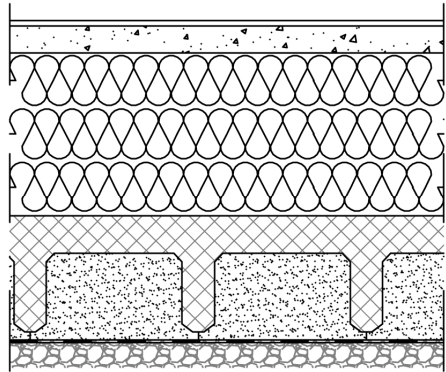
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO ESTERNO ($U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 46,6 \text{ cm}$ $U = 0,104 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 121 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,024 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 36,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 17 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 62,3 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 308 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,004 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 40 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 15,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 60,3 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 304 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 16,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 32,3 \text{ cm}$ $m_s = 274 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 39,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 64 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 374 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 35,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.31 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato all’esterno e alto livello di isolamento termico.

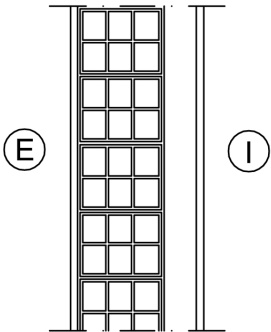
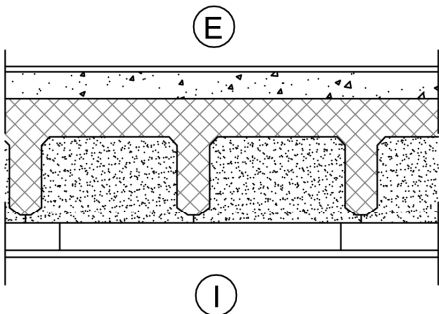
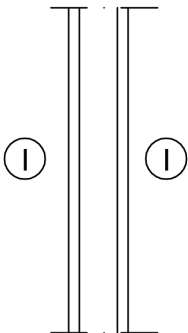
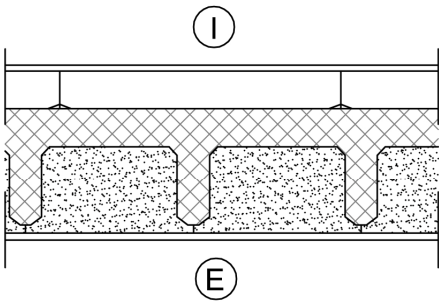
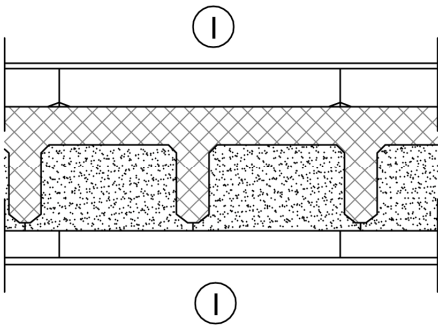
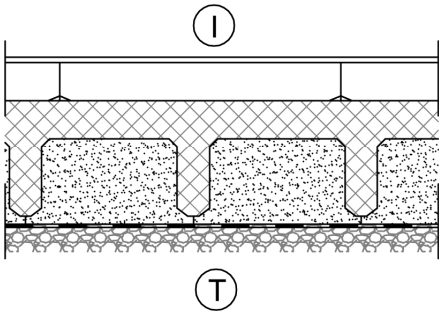
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO INTERNO (U = 0,9 W/m²K)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>s= 24,6 cm U= 0,918 W/m²K m_s= 123 kg/m² Y_{ie}= 0,653 W/m²K κ_{li}= 28,2 kJ/m²K κ_{le}= 48,6 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>s= 35,3 cm U= 0,71 W/m²K m_s= 286 kg/m² Y_{ie}= 0,176 W/m²K κ_{li}= 31,3 kJ/m²K κ_{le}= 56,3 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>s= 11 cm m_s= 36 kg/m² κ_{li}= 14,9 kJ/m²K κ_{le}= 14,9 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>s= 32,3 cm U= 0,73 W/m²K m_s= 243 kg/m² κ_{li}= 28,6 kJ/m²K κ_{le}= 55 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>s= 37,3 cm m_s= 239 kg/m² κ_{li}= 29 kJ/m²K κ_{le}= 29 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>s= 36 cm U= 0,72 W/m²K m_s= 313 kg/m² κ_{li}= 27,4 kJ/m²K</p> 

Figura 3.32 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato all’interno e basso livello di isolamento termico.

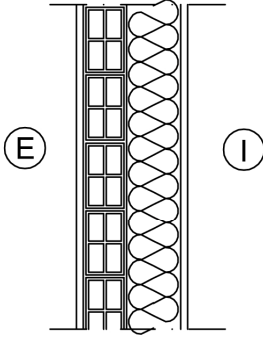
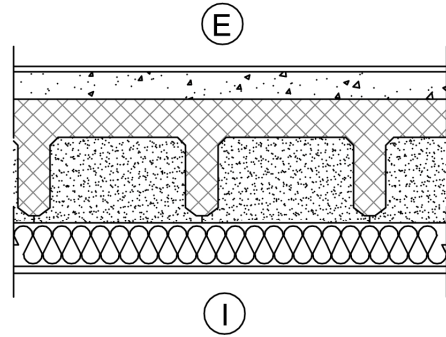
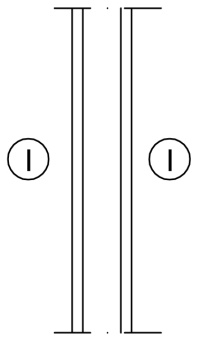
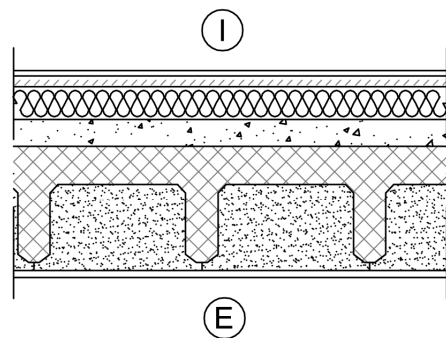
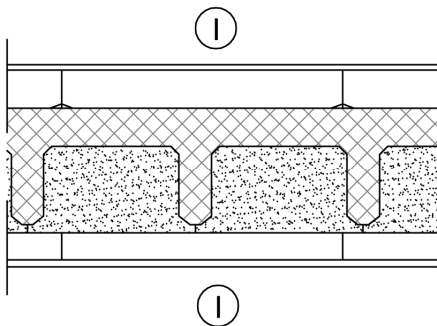
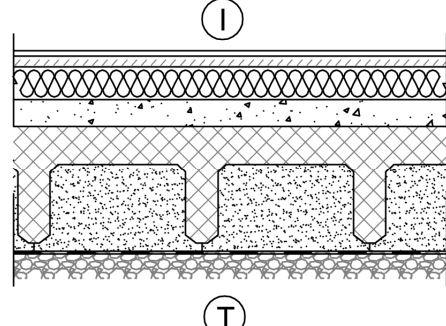
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO INTERNO ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 20,6 \text{ cm}$ $U = 0,297 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 82 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,247 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 14,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 46,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 38,3 \text{ cm}$ $U = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 291 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,037 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 13 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 54,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 38,3 \text{ cm}$ $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 288 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 51,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 37,3 \text{ cm}$ $m_s = 239 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 29 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 29 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 42 \text{ cm}$ $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 358 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.33 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato all’interno e medio livello di isolamento termico.

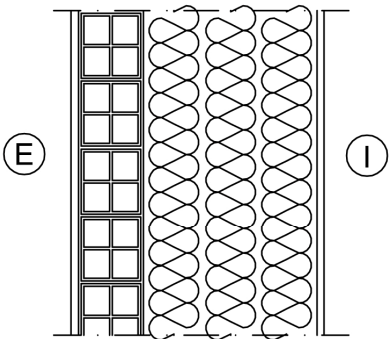
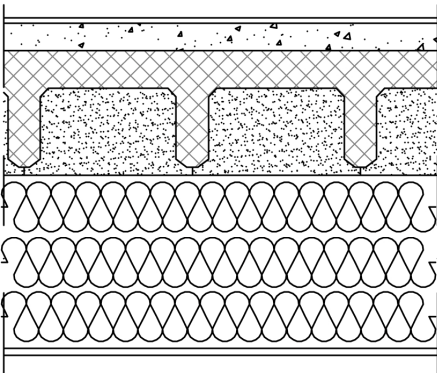
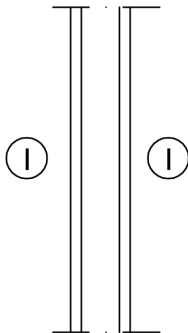
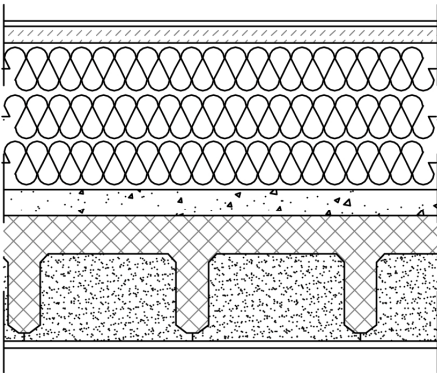
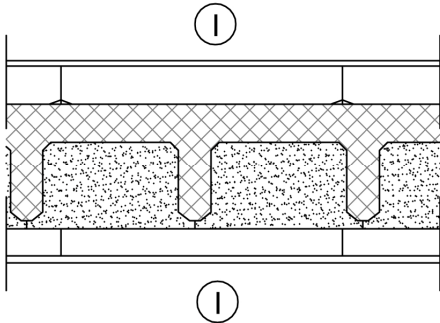
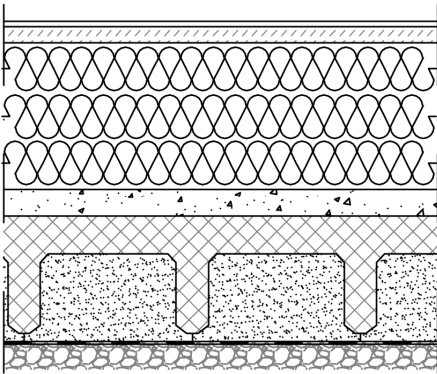
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO INTERNO (U = 0,1 W/m²K)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>s = 46,6 cm U = 0,104 W/m²K m_s = 121 kg/m² Y_{ie} = 0,029 W/m²K κ_i = 13,9 kJ/m²K κ_e = 48,1 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>s = 62,3 cm U = 0,10 W/m²K m_s = 308 kg/m² Y_{ie} = 0,005 W/m²K κ_i = 13,9 kJ/m²K κ_e = 53,7 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>s = 11 cm m_s = 36 kg/m² κ_i = 14,9 kJ/m²K κ_e = 14,9 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>s = 60,3 cm U = 0,10 W/m²K m_s = 304 kg/m² κ_i = 15,3 kJ/m²K κ_e = 51,6 kJ/m²K</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>s = 37,3 cm m_s = 239 kg/m² κ_i = 29 kJ/m²K κ_e = 29 kJ/m²K</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>s = 64 cm U = 0,10 W/m²K m_s = 374 kg/m² κ_i = 15,3 kJ/m²K</p> 

Figura 3.34 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato all’interno e alto livello di isolamento termico.

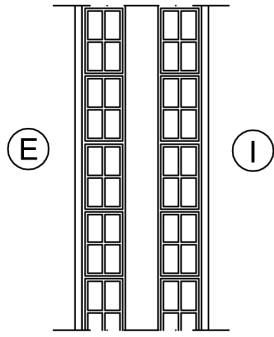
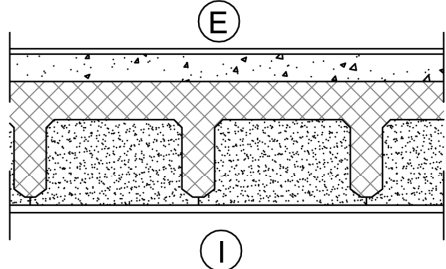
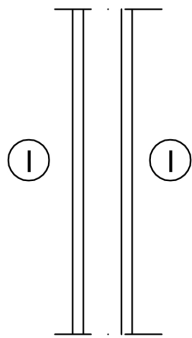
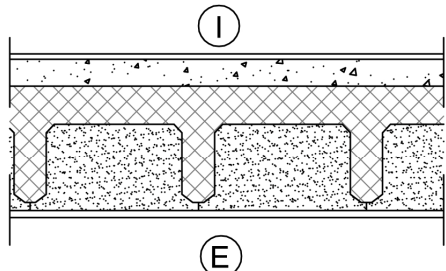
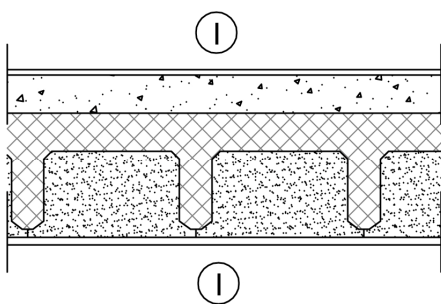
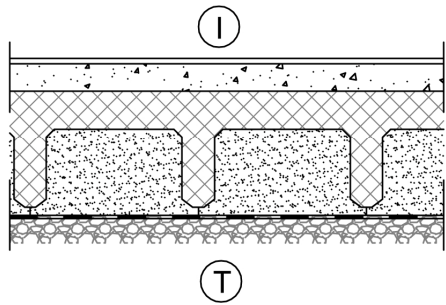
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE ($U = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 24,6 \text{ cm}$ $U = 0,918 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 123 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,697 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 35,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 47,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 30,3 \text{ cm}$ $U = 0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 286 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,251 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 43,7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 57,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 30,3 \text{ cm}$ $U = 0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 283 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 37,8 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 54,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 32,3 \text{ cm}$ $m_s = 274 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 39,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 34 \text{ cm}$ $U = 0,76 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 353 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 37,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.35 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato nell’intercapedine e basso livello di isolamento termico.

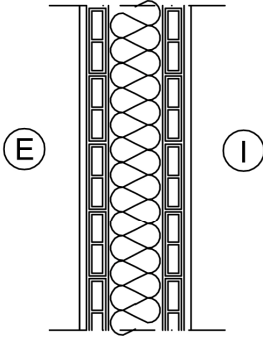
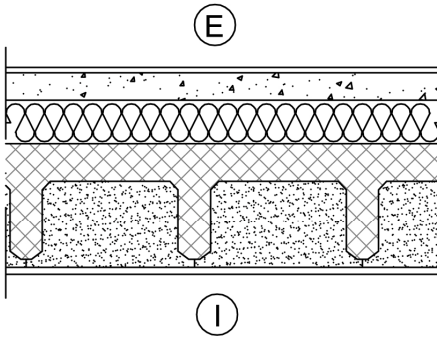
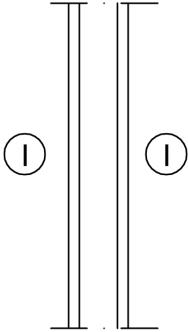
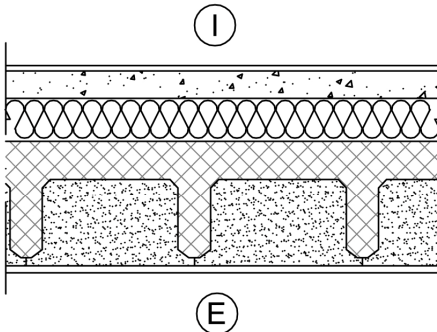
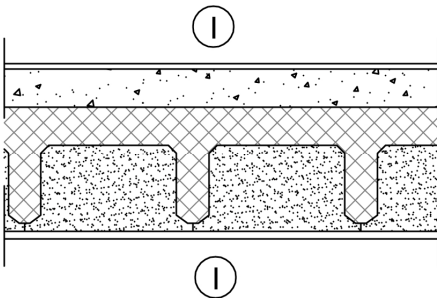
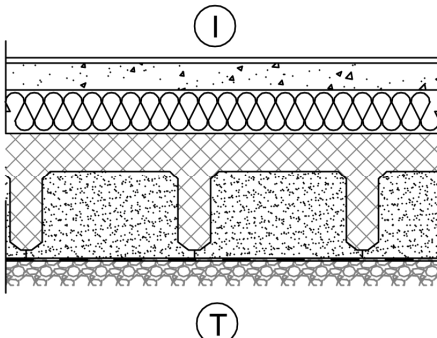
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE ($U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 20,6 \text{ cm}$ $U = 0,297 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 82 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,257 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 29,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 35,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 38,3 \text{ cm}$ $U = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 291 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,040 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 40,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 44,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 38,3 \text{ cm}$ $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 288 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 51,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 32,3 \text{ cm}$ $m_s = 274 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 39,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 42 \text{ cm}$ $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 358 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.36 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato nell’intercapedine e medio livello di isolamento termico.

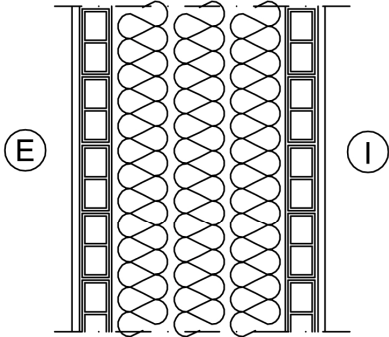
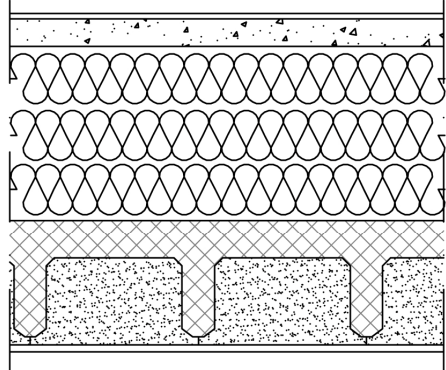
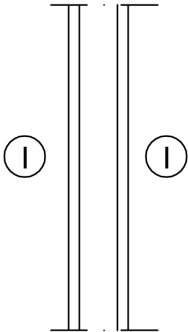
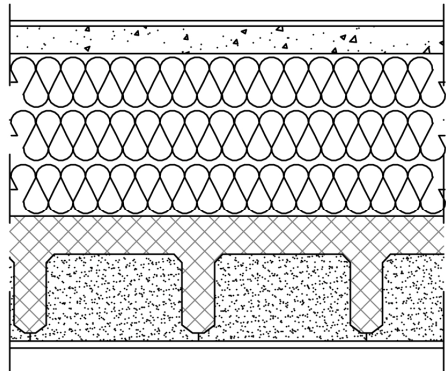
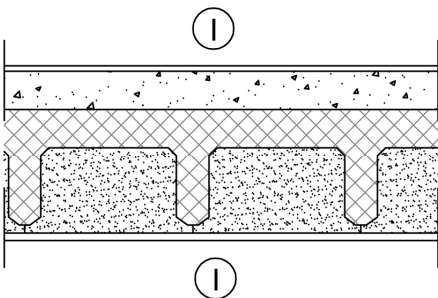
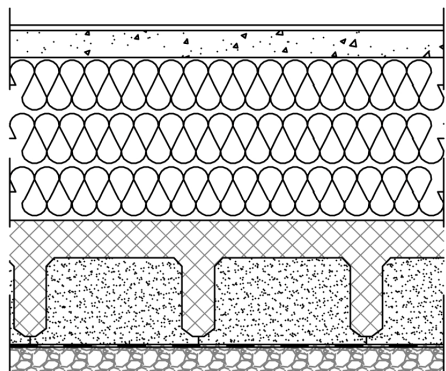
STRUTTURA LEGGERA, ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE ($U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)	
<p>Chiusura verticale</p> <p>$s = 46,6 \text{ cm}$ $U = 0,104 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 121 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,034 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 33,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 41 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale superiore</p> <p>$s = 62,3 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 308 \text{ kg/m}^2$ $Y_{ie} = 0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\kappa_i = 40 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 46,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione verticale</p> <p>$s = 11 \text{ cm}$ $m_s = 36 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 14,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su esterno)</p> <p>$s = 60,3 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 304 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 35,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 51,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 
<p>Partizione orizzontale</p> <p>$s = 32,3 \text{ cm}$ $m_s = 274 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 34,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\kappa_e = 39,1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 	<p>Chiusura orizzontale inferiore (su terreno)</p> <p>$s = 64 \text{ cm}$ $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ $m_s = 374 \text{ kg/m}^2$ $\kappa_i = 35,3 \text{ kJ/m}^2\text{K}$</p> 

Figura 3.37 Scheda relativa alla struttura edilizia “leggera” con materiale isolante posizionato nell’intercapedine e alto livello di isolamento termico.

3.3. Lo sviluppo dell'analisi parametrica

3.3.1. Realizzazione di un campione di casi rappresentativo

A ciascuno dei due edifici oggetto di studio è associato l'insieme dei valori o “designazioni” assunti dai parametri soggetti a variazione, precedentemente individuati. In tal modo, essendo previsti tre livelli di estensione della superficie vetrata, tre livelli di prestazione termica delle superfici d'involucro trasparente, due diverse configurazioni della schermatura solare, tre diversi trattamenti superficiali esterni dell'involucro opaco, tre livelli di isolamento termico dell'involucro edilizio opaco e sei diversi livelli di capacità termica della struttura edilizia, risultano 972 varianti per ciascuno dei due edifici.

Non potendo realizzare tutte le simulazioni numeriche necessarie per analizzare il campione nel suo complesso, si è optato per l'individuazione di un campione rappresentativo di 60 casi per ciascun edificio oggetto di studio. Ogni caso è rappresentato da una differente combinazione dei parametri analizzati, realizzata con la tecnica di campionamento *Latin Hypercube* mediante l'applicazione del software di analisi statistica *Simlab 2.2*.

La tecnica di campionamento *Latin Hypercube* può essere considerata un caso particolare di campionamento stratificato. L'obiettivo del campionamento stratificato è quello di ottenere una migliore copertura del campione rappresentato dai parametri d'ingresso. Nel *Latin Hypercube* l'intervallo rappresentato da ciascun fattore di input X_j , $j = 1, 2 \dots k$, è suddiviso in N intervalli di equa probabilità ed ogni osservazione di ciascun fattore viene effettuata in ciascun intervallo utilizzando un campionamento casuale all'interno di quell'intervallo. Perciò, ci sono N intervalli di osservazioni non sovrapposti per ciascuno dei k parametri di input. Una delle osservazioni effettuate sul parametro X_1 viene selezionata casualmente (ciascuna osservazione ha un'equa probabilità di essere selezionata), viene abbinata ad un'osservazione effettuata selezionando casualmente X_2 , e così via fino a X_k . Questi parametri costituiscono insieme un primo campione, x_1 . Una delle rimanenti osservazioni di X_1 è poi abbinata casualmente con una delle rimanenti osservazioni di X_2 , e così via fino a X_k , in modo da ottenere x_2 . Una procedura analoga viene effettuata per $x_3, \dots x_N$, che esaurisce le osservazioni e si risolve in un campione *Latin Hypercube*. Il metodo assicura che il parametro di ingresso abbia tutti gli intervalli della sua distribuzione rappresentati da valori di input.

In questo caso particolare, tuttavia, i valori assunti da ciascun parametro sono discreti, ovvero non si caratterizzano con un intervallo, ma costituiscono in sé una precisa osservazione; essi sono stati selezionati attribuendo a ciascuno la stessa probabilità di verificarsi all'interno del campione. Per ciascun parametro caratterizzato da un insieme S di valori discreti s , è stata assunta una funzione di distribuzione discreta uniforme (cfr. Figura 3.38) all'interno del campione; si tratta di una distribuzione di probabilità che attribuisce la stessa ammissibilità ad ogni elemento s dell'insieme discreto S su cui è definita:

$$P(s) = \frac{1}{\#S} \text{ per ogni elemento } s \in S \quad (3.2)$$

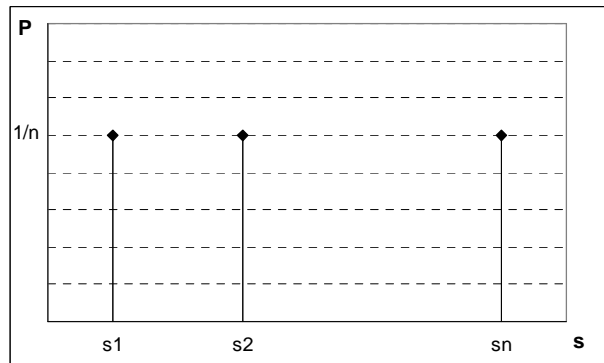


Figura 3.38 Funzione di distribuzione discreta uniforme.

In Tabella 3.13 sono riportati i valori discreti assunti da ciascun parametro con l'indicazione per ciascun valore della probabilità all'interno del campione, secondo la funzione di distribuzione discreta uniforme.

Tabella 3.13 Probabilità assunta da ciascun valore discreto all'interno del campione secondo la funzione di distribuzione di probabilità discreta uniforme.

PARAMETRO	VALORE		PROBABILITÀ ALL'INTERNO DEL CAMPIONE
$A_w/A_{env,oi}$	Residenziale	Ufficio	
	0,07	0,12	1/3
	0,14	0,17	1/3
	0,27	0,28	1/3
Tipologia di vetro	VETRO SINGOLO		1/3
	VETRO-CAMERA		1/3
	VETRO TRIPLO		1/3
Schermatura solare	ON		1/2
	OFF		1/2
Colore della superficie esterna	CHIARO		1/3
	MEDIO		1/3
	SCURO		1/3
Livello di isolamento termico dell'involucro opaco	BASSO		1/3
	MEDIO		1/3
	ALTO		1/3
Livello di capacità termica della struttura edilizia	PESANTE-esterno		1/6
	PESANTE-interno		1/6
	PESANTE-intercapedine		1/6
	LEGGERA-esterno		1/6
	LEGGERA-interno		1/6
	LEGGERA-intercapedine		1/6

Le sessanta diverse combinazioni dei sei parametri, che costituiscono il campione generato con la tecnica *Latin Hypercube* per valori discreti, sono riportate in Tabella 3.14. Poiché i parametri soggetti a variazione sono gli stessi per i due casi studio – a meno dell'estensione della superficie

trasparente che varia per l'edificio ad uso residenziale e per l'edificio ad uso uffici – e l'ordine di campionamento è ininfluente ai fini dell'analisi, la tipologia del campione risultante è la stessa.

Tabella 3.14 Campione costituito da 60 combinazioni dei parametri, valido per entrambi i casi studio a meno del parametro $A_w/A_{env,oi}$.

Osservazioni	$A_w/A_{env,oi}$		Tipologia di vetro	Schermatura solare	Colore della superficie esterna	Livello di isolamento termico dell'involucro opaco	Livello di capacità termica della struttura edilizia
	Res.	Uff.					
1	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	OFF	CHIARO	MEDIO	LEGGERA-esterno
2	0,27	0,28	VETRO-CAMERA	OFF	CHIARO	ALTO	PESANTE-interno
3	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	ON	SCURO	ALTO	PESANTE-esterno
4	0,14	0,17	VETRO TRIPLO	OFF	MEDIO	BASSO	PESANTE-esterno
5	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	OFF	SCURO	BASSO	LEGGERA-interno
6	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	OFF	CHIARO	BASSO	LEGGERA-interno
7	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	OFF	CHIARO	MEDIO	LEGGERA-intercapedine
8	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	ON	MEDIO	BASSO	PESANTE-interno
9	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	OFF	CHIARO	BASSO	LEGGERA-intercapedine
10	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	ON	MEDIO	MEDIO	PESANTE-interno
11	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	ON	SCURO	MEDIO	LEGGERA-interno
12	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	OFF	MEDIO	BASSO	PESANTE-interno
13	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	ON	SCURO	BASSO	LEGGERA-intercapedine
14	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	ON	SCURO	ALTO	LEGGERA-interno
15	0,07	0,12	VETRO SINGOLO	ON	SCURO	ALTO	LEGGERA-esterno
16	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	OFF	SCURO	BASSO	LEGGERA-interno
17	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	ON	CHIARO	MEDIO	LEGGERA-interno
18	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	ON	SCURO	BASSO	PESANTE-interno
19	0,07	0,12	VETRO SINGOLO	ON	CHIARO	BASSO	PESANTE-esterno
20	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	OFF	SCURO	ALTO	PESANTE-intercapedine
21	0,27	0,28	VETRO-CAMERA	ON	MEDIO	BASSO	LEGGERA-interno
22	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	OFF	CHIARO	ALTO	LEGGERA-intercapedine
23	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	OFF	MEDIO	ALTO	LEGGERA-esterno
24	0,14	0,17	VETRO TRIPLO	ON	MEDIO	MEDIO	LEGGERA-interno
25	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	ON	SCURO	MEDIO	LEGGERA-esterno
26	0,27	0,28	VETRO-CAMERA	ON	SCURO	BASSO	PESANTE-interno
27	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	ON	CHIARO	MEDIO	PESANTE-intercapedine
28	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	OFF	MEDIO	ALTO	PESANTE-esterno
29	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	ON	CHIARO	ALTO	LEGGERA-intercapedine
30	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	ON	MEDIO	ALTO	LEGGERA-intercapedine
31	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	ON	CHIARO	BASSO	LEGGERA-interno
32	0,07	0,12	VETRO SINGOLO	OFF	SCURO	MEDIO	LEGGERA-esterno
33	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	OFF	SCURO	MEDIO	LEGGERA-intercapedine
34	0,27	0,28	VETRO-CAMERA	ON	CHIARO	MEDIO	LEGGERA-esterno
35	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	OFF	MEDIO	MEDIO	PESANTE-interno
36	0,14	0,17	VETRO TRIPLO	ON	MEDIO	MEDIO	PESANTE-esterno
37	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	OFF	MEDIO	MEDIO	LEGGERA-esterno
38	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	ON	MEDIO	BASSO	PESANTE-esterno
39	0,27	0,28	VETRO-CAMERA	OFF	CHIARO	ALTO	PESANTE-intercapedine

Osservazioni	$A_w/A_{env,oi}$		Tipologia di vetro	Schermatura solare	Colore della superficie esterna	Livello di isolamento termico dell'involucro opaco	Livello di capacità termica della struttura edilizia
	Res.	Uff.					
40	0,07	0,12	VETRO SINGOLO	OFF	MEDIO	ALTO	PESANTE-interno
41	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	ON	SCURO	ALTO	PESANTE-intercapedine
42	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	OFF	CHIARO	ALTO	PESANTE-interno
43	0,07	0,12	VETRO SINGOLO	ON	SCURO	ALTO	LEGGERA-interno
44	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	ON	CHIARO	BASSO	LEGGERA-intercapedine
45	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	OFF	MEDIO	MEDIO	PESANTE-intercapedine
46	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	ON	SCURO	BASSO	LEGGERA-esterno
47	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	OFF	MEDIO	BASSO	PESANTE-intercapedine
48	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	OFF	MEDIO	ALTO	PESANTE-intercapedine
49	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	ON	MEDIO	MEDIO	PESANTE-esterno
50	0,07	0,12	VETRO TRIPLO	ON	SCURO	ALTO	LEGGERA-intercapedine
51	0,27	0,28	VETRO SINGOLO	ON	CHIARO	BASSO	LEGGERA-intercapedine
52	0,07	0,12	VETRO-CAMERA	OFF	MEDIO	MEDIO	LEGGERA-interno
53	0,14	0,17	VETRO TRIPLO	OFF	CHIARO	BASSO	PESANTE-esterno
54	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	OFF	MEDIO	MEDIO	PESANTE-interno
55	0,14	0,17	VETRO TRIPLO	OFF	SCURO	MEDIO	PESANTE-intercapedine
56	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	ON	CHIARO	BASSO	PESANTE-intercapedine
57	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	ON	MEDIO	BASSO	PESANTE-intercapedine
58	0,27	0,28	VETRO TRIPLO	OFF	CHIARO	ALTO	LEGGERA-esterno
59	0,14	0,17	VETRO-CAMERA	OFF	CHIARO	ALTO	PESANTE-esterno
60	0,14	0,17	VETRO SINGOLO	OFF	SCURO	MEDIO	PESANTE-intercapedine

3.3.2. Prime considerazioni sul campione analizzato

Definito il campione rappresentativo, si procede con l'analisi di ciascuno dei sessanta casi attraverso l'applicazione della simulazione numerica dettagliata in regime dinamico, seguendo la modalità di analisi termica descritta al capitolo 2 e andando, perciò, a scomporre i termini del bilancio termico per esprimerli in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno. L'obiettivo è individuare, preliminarmente, l'influenza dell'involucro sul fabbisogno netto di energia termica per il raffrescamento degli edifici in esame nel mese di luglio.

La relazione che intercorre tra il contributo dei termini del bilancio di energia legati all'involucro e il contributo di quelli non legati all'involucro al carico termico medio mensile permette di formulare alcune prime considerazioni (Figura 3.39, per l'edificio ad uso residenziale, e Figura 3.40, per l'edificio ad uso uffici).

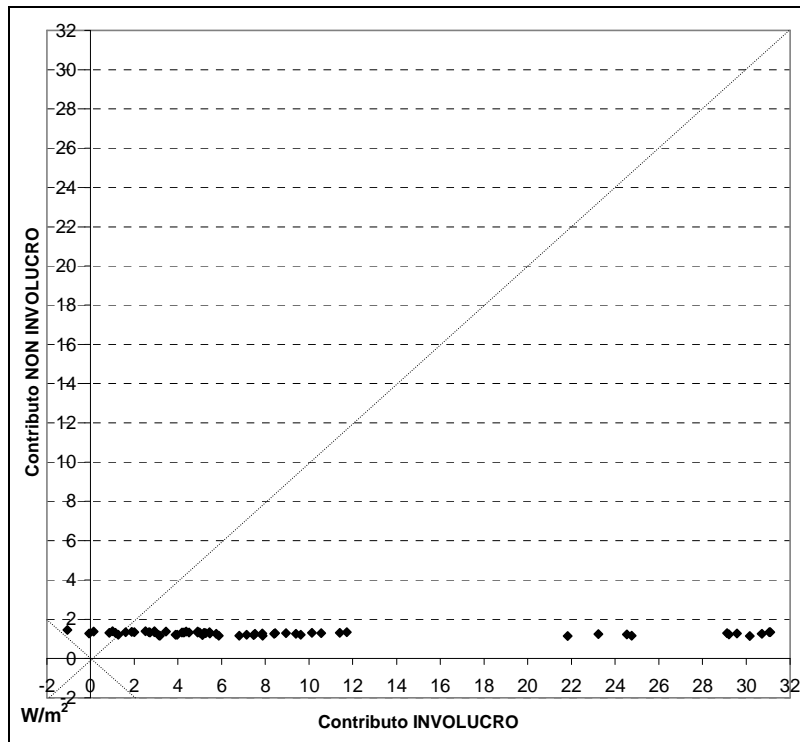


Figura 3.39 Relazione tra il contributo dei termini del bilancio di energia non legati all'involucro e il contributo dei termini legati all'involucro al carico termico medio mensile (luglio) per il campione analizzato, in riferimento all'edificio ad uso residenziale.

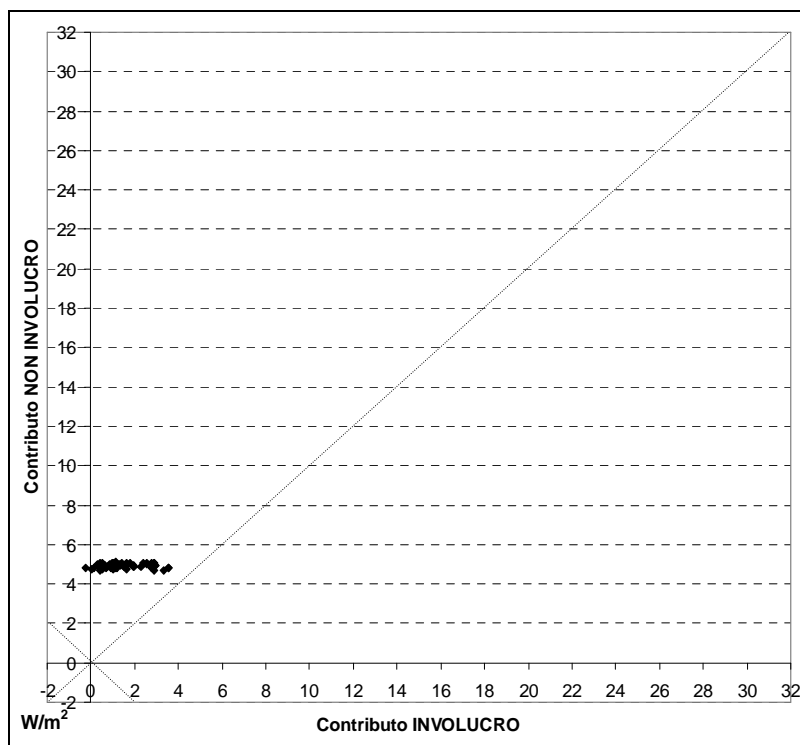


Figura 3.40 Relazione tra il contributo dei termini del bilancio di energia non legati all'involucro e il contributo dei termini legati all'involucro al carico termico medio mensile (luglio) per il campione analizzato, in riferimento all'edificio ad uso uffici.

La Figura 3.39 evidenzia, per l'edificio ad uso residenziale e per quasi la totalità del campione analizzato, l'influenza preponderante dell'involucro edilizio sulla prestazione termica estiva dell'edificio rispetto a quei termini non legati all'involucro, ossia l'effetto delle sorgenti termiche interne e del carico di ventilazione. Stabilita quindi l'importanza del contributo dell'involucro edilizio alla prestazione termica estiva dell'edificio, si può procedere ad indagare l'effetto della parte opaca dell'involucro e soprattutto l'effetto dell'isolamento termico, andando in tal modo ad individuare quali sono i parametri relativi all'involucro che maggiormente influenzano la prestazione termica in regime di raffrescamento.

Un diverso discorso merita l'edificio ad uso uffici, in cui, in base alla Figura 3.40, il contributo dei termini del bilancio di energia non legati all'involucro supera ampiamente il contributo dei termini legati all'involucro sul fabbisogno termico estivo dell'edificio. In questo caso giocano un ruolo preponderante le sorgenti di calore interne. A partire da questa considerazione, risulterebbe meno importante indagare l'effetto dell'isolamento termico dell'involucro opaco sulla prestazione termica estiva di questo caso studio, visto il già limitato contributo dell'involucro edilizio nel suo complesso.

3.3.3. Individuazione di parametri “semi-empirici”

Per individuare i parametri legati all'involucro che maggiormente influenzano la prestazione termica in regime di raffrescamento, soprattutto nel caso dell'edificio residenziale, lo studio prevede l'effettuazione di un'analisi di sensibilità sul campione analizzato. Tuttavia, poiché a non tutti i parametri considerati può essere associato un valore numerico – si pensi ad esempio al funzionamento “ON/OFF” della schermatura solare – vengono definiti sei parametri “semi-empirici” al posto dei parametri definiti in precedenza. I parametri “semi-empirici”, oltre che a quantificare aspetti di tipo qualitativo, servono anche ad accorpare parametri riferiti a singoli componenti in modo da caratterizzare la prestazione di un intero sistema (es. l'intero involucro edilizio, l'intera struttura ...).

Si definiscono parametri “semi-empirici” perché i valori assunti descrivono in qualche modo il fenomeno fisico che ne è alla base. Essi sono elencati in Tabella 3.15. Si consideri che due di questi parametri coincidono con quelli già precedentemente definiti, in quanto caratterizzati da un valore numerico che non necessita di ulteriori elaborazioni: si tratta dell'estensione della superficie trasparente ($A_w/A_{env,oi}$) e del coefficiente di assorbimento solare della superficie opaca esterna (α_{sol}).

I valori assunti dai parametri “semi-empirici” del campione analizzato sono riportati in Tabella 3.16 per l'edificio ad uso residenziale e in Tabella 3.17 per l'edificio ad uso uffici.

Tabella 3.15 Parametri “semi-empirici” individuati a partire dalle designazioni originarie.

	PARAMETRO SEMI-EMPIRICO		
	Nome	Determinazione	Note
ESTENSIONE DELLA SUPERFICIE TRASPARENTE	$A_w/A_{env,oi}$	-	-
ISOLAMENTO TERMICO INVOLUCRO TRASPARENTE	$U_{w,m}$	$U_{w,m} = \frac{\sum_{i=1}^{Nw} U_{w,i} \cdot A_{w,i}}{\sum_{i=1}^{Nw} A_{w,i}} \quad (3.3)$	La trasmittanza termica dell'involucro trasparente dell'edificio è la media pesata dei valori di trasmittanza termica dei singoli serramenti, determinati dai parametri prestazionali riportati in Tabella 3.7
PARAMETRO SOLARE INVOLUCRO TRASPARENTE	F_{sol}	$F_{sol} = \frac{\sum_{i=1}^{Ngl} F_{sh,i} \cdot A_{gl,i} \cdot I_{sol,i}}{\sum_{i=1}^{Ngl} A_{gl,i} \cdot I_{sol,i}} \quad (3.4)$ $F_{sh,i} = (1 - f_{sh,with,i}) \cdot g_{gl} + f_{sh,with,i} \cdot g_{gl+sh} \quad (3.5)$	F_{sol} contiene in sé le informazioni relative all'utilizzo della schermatura ($f_{sh,with}$), alla tipologia di vetro (g_{gl}), alla tipologia della schermatura accoppiata al vetro (g_{gl+sh}), all'entità della superficie vetrata (A_{gl}) per orientamento (I_{sol})
PARAMETRO SOLARE INVOLUCRO OPACO	α_{sol}	-	-
ISOLAMENTO TERMICO INVOLUCRO OPACO	$U_{op,m}$	$U_{op,m} = \frac{\sum_{i=1}^{Nop} U_{op,i} \cdot A_{op,i}}{\sum_{i=1}^{Nop} A_{op,i}} \quad (3.6)$	La trasmittanza termica dell'involucro edilizio opaco è la media pesata dei valori di trasmittanza termica dei singoli componenti, secondo le schede riportate da Figura 3.20 a Figura 3.37
CAPACITÀ TERMICA INVOLUCRO OPACO	$\kappa_{i,m}$	$\kappa_{i,m} = \frac{\sum_{j=1}^{Nint} \kappa_{i,j} \cdot A_{i,j}}{\sum_{j=1}^{Nint} A_{i,j}} \quad (3.7)$	La capacità termica interna dell'edificio è la media pesata dei valori di capacità termica areica interna dei singoli componenti, secondo le schede riportate da Figura 3.20 a Figura 3.37

Tabella 3.16 Valori dei parametri “semi-empirici” del campione riferito all’edificio ad uso residenziale.

Osservazioni	$A_w/A_{env,oi}$	$U_{w,m}$ [W/(m ² K)]	F_{sol} [-]	α_{sol} [-]	$U_{op,m}$ [W/(m ² K)]	$\kappa_{i,m}$ [kJ/(m ² K)]
1	0,07	2,40	0,70	0,3	0,29	29,9
2	0,27	2,45	0,70	0,3	0,10	28,9
3	0,27	0,73	0,48	0,9	0,10	61,5
4	0,14	0,75	0,59	0,6	0,89	62,4
5	0,07	0,76	0,59	0,9	0,81	24,4
6	0,27	0,73	0,59	0,3	0,79	23,8
7	0,27	5,52	0,82	0,3	0,29	27,6
8	0,14	5,41	0,71	0,6	0,89	31,8
9	0,07	0,76	0,59	0,3	0,85	30,5
10	0,07	0,76	0,54	0,6	0,30	27,8
11	0,14	5,41	0,71	0,9	0,29	16,7
12	0,27	5,52	0,82	0,6	0,88	32,1
13	0,14	5,41	0,71	0,9	0,84	30,3
14	0,14	5,41	0,71	0,9	0,10	16,8
15	0,07	5,33	0,71	0,9	0,10	29,8
16	0,27	5,52	0,82	0,9	0,80	23,9
17	0,14	2,42	0,62	0,3	0,29	16,7
18	0,14	2,42	0,62	0,9	0,89	31,8
19	0,07	5,33	0,71	0,3	0,89	62,5
20	0,27	5,52	0,82	0,9	0,10	62,5
21	0,27	2,45	0,53	0,6	0,79	23,9
22	0,27	0,73	0,59	0,3	0,10	28,4
23	0,14	5,41	0,82	0,6	0,10	29,5
24	0,14	0,75	0,54	0,6	0,29	16,7
25	0,27	0,73	0,48	0,9	0,29	28,9
26	0,27	2,45	0,53	0,9	0,88	32,1
27	0,07	2,40	0,61	0,3	0,29	63,0
28	0,07	0,76	0,59	0,6	0,10	61,8
29	0,07	2,40	0,61	0,3	0,10	29,1
30	0,27	5,52	0,61	0,6	0,10	28,4
31	0,27	0,73	0,48	0,3	0,79	23,8
32	0,07	5,33	0,82	0,9	0,29	29,9
33	0,07	2,40	0,70	0,9	0,29	28,0
34	0,27	2,45	0,53	0,3	0,29	29,0
35	0,07	0,76	0,59	0,6	0,30	27,8
36	0,14	0,75	0,54	0,6	0,30	61,9
37	0,14	2,42	0,70	0,6	0,29	29,6
38	0,07	2,40	0,61	0,6	0,89	62,5
39	0,27	2,45	0,70	0,3	0,10	62,5
40	0,07	5,33	0,82	0,6	0,10	28,0
41	0,07	2,40	0,61	0,9	0,10	62,8
42	0,27	5,52	0,82	0,3	0,10	28,8
43	0,07	5,33	0,71	0,9	0,10	16,7
44	0,14	2,42	0,62	0,3	0,84	30,3
45	0,27	0,73	0,59	0,6	0,29	62,5
46	0,07	2,40	0,61	0,9	0,85	30,7
47	0,07	0,76	0,59	0,6	0,89	63,7
48	0,14	2,42	0,70	0,6	0,10	62,7
49	0,27	0,73	0,48	0,6	0,30	61,6
50	0,07	0,76	0,54	0,9	0,10	29,1
51	0,27	5,52	0,61	0,3	0,83	29,7
52	0,07	2,40	0,70	0,6	0,29	16,6
53	0,14	0,75	0,59	0,3	0,89	62,4
54	0,14	2,42	0,70	0,6	0,30	28,0
55	0,14	0,75	0,59	0,9	0,29	62,8
56	0,14	5,41	0,71	0,3	0,89	63,6
57	0,14	2,42	0,62	0,6	0,89	63,6
58	0,27	0,73	0,59	0,3	0,10	28,8
59	0,14	2,42	0,70	0,3	0,10	61,7
60	0,14	5,41	0,82	0,9	0,29	62,9

Tabella 3.17 Valori dei parametri “semi-empirici” del campione riferito all’edificio ad uso uffici.

Osservazioni	$A_w/A_{env,oi}$	$U_{w,m}$ [W/(m ² K)]	F_{sol} [-]	α_{sol} [-]	$U_{op,m}$ [W/(m ² K)]	$\kappa_{i,m}$ [kJ/(m ² K)]
1	0,12	2,38	0,70	0,3	0,30	28,1
2	0,28	2,42	0,70	0,3	0,10	35,0
3	0,28	0,75	0,57	0,9	0,10	63,7
4	0,17	0,76	0,59	0,6	0,91	63,7
5	0,12	0,78	0,59	0,9	0,94	23,4
6	0,28	0,75	0,59	0,3	0,94	23,3
7	0,28	5,41	0,82	0,3	0,30	27,4
8	0,17	5,32	0,68	0,6	0,91	35,4
9	0,12	0,78	0,59	0,3	0,94	28,0
10	0,12	0,78	0,57	0,6	0,29	34,8
11	0,17	5,32	0,68	0,9	0,30	22,0
12	0,28	5,41	0,82	0,6	0,91	35,5
13	0,17	5,32	0,68	0,9	0,94	28,0
14	0,17	5,32	0,68	0,9	0,10	21,9
15	0,12	5,22	0,68	0,9	0,10	28,1
16	0,28	5,41	0,82	0,9	0,94	23,3
17	0,17	2,40	0,60	0,3	0,30	22,0
18	0,17	2,40	0,60	0,9	0,91	35,4
19	0,12	5,22	0,68	0,3	0,91	63,7
20	0,28	5,41	0,82	0,9	0,10	63,7
21	0,28	2,42	0,60	0,6	0,94	23,3
22	0,28	0,75	0,59	0,3	0,10	27,7
23	0,17	5,32	0,82	0,6	0,10	28,1
24	0,17	0,76	0,57	0,6	0,30	22,0
25	0,28	0,75	0,57	0,9	0,30	28,0
26	0,28	2,42	0,60	0,9	0,91	35,5
27	0,12	2,38	0,60	0,3	0,29	63,9
28	0,12	0,78	0,59	0,6	0,10	63,7
29	0,12	2,38	0,60	0,3	0,10	27,8
30	0,28	5,41	0,68	0,6	0,10	27,7
31	0,28	0,75	0,57	0,3	0,94	23,3
32	0,12	5,22	0,82	0,9	0,30	28,1
33	0,12	2,38	0,70	0,9	0,30	27,4
34	0,28	2,42	0,60	0,3	0,30	28,0
35	0,12	0,78	0,59	0,6	0,29	34,8
36	0,17	0,76	0,57	0,6	0,29	63,7
37	0,17	2,40	0,70	0,6	0,30	28,1
38	0,12	2,38	0,60	0,6	0,91	63,7
39	0,28	2,42	0,70	0,3	0,10	63,7
40	0,12	5,22	0,82	0,6	0,10	34,7
41	0,12	2,38	0,60	0,9	0,10	63,7
42	0,28	5,41	0,82	0,3	0,10	34,9
43	0,12	5,22	0,68	0,9	0,10	21,9
44	0,17	2,40	0,60	0,3	0,94	28,0
45	0,28	0,75	0,59	0,6	0,29	63,9
46	0,12	2,38	0,60	0,9	0,94	28,2
47	0,12	0,78	0,59	0,6	0,91	64,1
48	0,17	2,40	0,70	0,6	0,10	63,7
49	0,28	0,75	0,57	0,6	0,29	63,7
50	0,12	0,78	0,57	0,9	0,10	27,8
51	0,28	5,41	0,68	0,3	0,94	27,9
52	0,12	2,38	0,70	0,6	0,30	22,0
53	0,17	0,76	0,59	0,3	0,91	63,7
54	0,17	2,40	0,70	0,6	0,29	34,8
55	0,17	0,76	0,59	0,9	0,29	63,9
56	0,17	5,32	0,68	0,3	0,91	64,0
57	0,17	2,40	0,60	0,6	0,91	64,0
58	0,28	0,75	0,59	0,3	0,10	28,0
59	0,17	2,40	0,70	0,3	0,10	63,7
60	0,17	5,32	0,82	0,9	0,29	63,9

Una premessa necessaria per poter sviluppare l'analisi di sensibilità riguarda l'interdipendenza che potrebbe sussistere tra i fattori analizzati. Infatti, dovendo studiare il peso di ciascun parametro sul fabbisogno netto di energia per il raffrescamento occorre che i parametri siano tra loro indipendenti, ovvero non correlati. Per correlazione si intende, infatti, una relazione tra due variabili casuali tale che a ciascun valore della prima variabile corrisponda con una certa regolarità un valore della seconda. Non si tratta necessariamente di un rapporto di causa ed effetto, ma semplicemente della tendenza di una variabile a variare in funzione di un'altra.

Per studiare il sussistere di correzioni tra le variabili occorre determinare, per ciascuna coppia di variabili parametriche, l'indice di correlazione di Pearson, detto anche coefficiente di correlazione di Pearson, che, tra due variabili aleatorie (x, y), esprime la linearità tra la loro covarianza e il prodotto delle rispettive deviazioni standard, come:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (3.8)$$

dove la covarianza di due variabili aleatorie (x, y) è un numero che fornisce una misura di quanto le due variano assieme, ovvero della loro dipendenza. Su un campione di n osservazioni congiunte (x, y) di rispettive medie osservate \bar{x} e \bar{y} , la covarianza osservata è:

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n-1)} \quad (3.9)$$

mentre la deviazione standard si definisce come:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (3.10)$$

e

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)}} \quad (3.11)$$

Il coefficiente di correlazione di Pearson (ρ_{xy}) assume sempre valori compresi tra -1 e 1. Se:

- $\rho_{xy} > 0$, le variabili x e y si dicono direttamente correlate, oppure correlate positivamente;
- $\rho_{xy} = 0$, le variabili x e y si dicono incorrelate;
- $\rho_{xy} < 0$, le variabili x e y si dicono inversamente correlate, oppure correlate negativamente.

Per la correlazione diretta si distingue inoltre:

- $0 < \rho_{xy} < 0,3$, correlazione debole;
- $0,3 < \rho_{xy} < 0,7$, correlazione moderata;
- $\rho_{xy} > 0,7$, correlazione forte.

Gli indici di Pearson di z variabili possono essere presentati in una matrice di correlazione, che è una matrice quadrata di dimensione $[z, z]$ avente nelle righe e colonne le variabili oggetto di studio. La matrice è simmetrica ($\rho_{ji} = \rho_{ij}$) e i coefficienti sulla diagonale valgono 1, in quanto:

$$\rho_{ii} = \frac{\sigma_{ii}}{\sigma_i^2} \quad (3.12)$$

Gli indici di correlazione di Pearson, in riferimento alle variabili parametriche oggetto di studio ($z = 6$), sono stati ricavati mediante un software di analisi statistica (SPSS) che ha permesso di effettuare l'analisi di correlazione tra tutte le coppie di variabili sul campione di 60 osservazioni (cfr. Tabella 3.16 e Tabella 3.17). In Tabella 3.18 e in Tabella 3.19 sono riportati, rispettivamente per l'edificio ad uso residenziale e per l'edificio ad uso uffici, gli indici di correlazione di Pearson per tutte le coppie di parametri "semi-empirici" sottoforma di matrice di correlazione; all'interno delle tabelle sono rappresentati in grassetto gli indici che, essendo maggiori di 0,7, individuano una correlazione tra le variabili cui si riferiscono.

Tabella 3.18 Indici di correlazione di Pearson per le coppie di variabili sottoforma di matrice di correlazione (edificio ad uso residenziale).

	$A_w/A_{env,oi}$	$U_{w,m}$	F_{sol}	α_{sol}	$U_{op,m}$	$\kappa_{i,m}$
$A_w/A_{env,oi}$	1	-0,04	-0,17	-0,22	-0,02	-0,04
$U_{w,m}$	-0,04	1	0,80	0,15	-0,02	-0,19
F_{sol}	-0,17	0,80	1	0,07	-0,15	-0,10
α_{sol}	-0,22	0,15	0,07	1	-0,06	-0,05
$U_{op,m}$	-0,02	-0,02	-0,15	-0,06	1	0,06
$\kappa_{i,m}$	-0,04	-0,19	-0,10	-0,05	0,06	1

Tabella 3.19 Indici di correlazione di Pearson per le coppie di variabili sottoforma di matrice di correlazione (edificio ad uso uffici).

	$A_w/A_{env,oi}$	$U_{w,m}$	F_{sol}	α_{sol}	$U_{op,m}$	$\kappa_{i,m}$
$A_w/A_{env,oi}$	1	-0,14	-0,05	-0,22	0,01	-0,03
$U_{w,m}$	-0,14	1	0,79	0,15	-0,02	-0,19
F_{sol}	-0,05	0,79	1	0,08	-0,21	-0,11
α_{sol}	-0,22	0,15	0,08	1	-0,06	-0,04
$U_{op,m}$	0,01	-0,02	-0,21	-0,06	1	-0,02
$\kappa_{i,m}$	-0,03	-0,19	0,11	-0,04	-0,02	1

Attraverso l'analisi di correlazione di Pearson è emersa una discreta dipendenza tra le variabili $U_{w,m}$ e F_{sol} per entrambi i casi studio. Tuttavia, al di là dell'aspetto puramente statistico, dal punto di

vista fisico i due parametri rappresentano concetti molto diversi e per l'analisi vengono, perciò, mantenuti separati.

3.3.4. Analisi di sensibilità

L'analisi di sensibilità effettuata sul campione analizzato ha come obiettivo l'individuazione dell'influenza che ciascun parametro "semi-empirico" (variabile indipendente), ha sulla prestazione energetica estiva (variabile dipendente). La prestazione energetica viene espressa sia in termini di fabbisogno di energia netta per il raffrescamento per unità di superficie di pavimento (kWh/m^2) nel mese di luglio, sia in termini di potenza frigorifera massima nel mese di luglio per unità di superficie di pavimento (W/m^2).

L'analisi viene effettuata andando preliminarmente ad individuare una relazione che possa legare le variabili indipendenti (X_1, X_2, \dots, X_k) con la variabile dipendente (Y), ovvero definire un'equazione di regressione del carattere Y rispetto alle variabili X_1, X_2, \dots, X_k , con $k = 6$:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (3.13)$$

Con l'analisi di regressione si verifica l'ammissibilità della relazione funzionale, e, in caso affermativo, la determinazione di una stima della funzione f che lega la variabile risposta alle variabili esplicative.

La funzione che, tra quelle analizzate, meglio rappresenta la relazione tra le variabili indipendenti (parametri "semi-empirici", X_i) e la variabile dipendente (fabbisogno netto/potenza massima, Y) è la seguente:

$$Y = \frac{C}{1 + e^{\sum \gamma_i X_i + \gamma_0}} \quad (3.14)$$

Viene quindi effettuata una regressione lineare multipla, attraverso l'applicazione di un software di analisi statistica (SPSS), della variabile trasformata Y' , assumendo C (costante) pari al valore massimo cui può tendere Y nel campione. La variabile trasformata Y' è definita come:

$$Y' = \ln\left(\frac{C}{Y} - 1\right) = \gamma_1 \cdot \frac{A_w}{A_{\text{env},oi}} + \gamma_2 \cdot U_{w,m} + \gamma_3 \cdot F_{\text{sol}} + \gamma_4 \cdot \alpha_{\text{sol}} + \gamma_5 \cdot U_{\text{op},m} + \gamma_6 \cdot \kappa_{i,m} + \gamma_0 \quad (3.15)$$

L'analisi di regressione fornisce i valori dei coefficienti $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$, con $k = 6$, moltiplicativi delle variabili X_1, X_2, \dots, X_6 , e il valore della costante γ_0 . L'accuratezza della stima non dipende solo dalla numerosità del campione, ma anche dalla disposizione sull'asse x delle osservazioni X_i ; infatti, se la dispersione di tali osservazioni sull'asse è piccola, allora cresce la probabilità che le stime dei coefficienti γ_i siano lontane dai loro valori reali, ovvero quelli che applicati all'Eq. (3.14) fornirebbero un valore di \hat{Y} stimato coincidente con il valore di Y osservato. Nel caso in esame, il campione è discretamente rappresentativo e la variabilità dei parametri è significativa, perché si

prende in considerazione per ogni parametro un insieme di valori discreti i cui estremi rappresentano in certo qual modo le condizioni “limite” che si ritrovano nella realtà.

Tramite la regressione, viene calcolato un termine aleatorio (E), che è il *residuo*, o *errore*: considerato un qualunque valore di \hat{Y}_i stimato attraverso l'applicazione dei coefficienti $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_6$ alle variabili X_1, X_2, \dots, X_6 , il residuo descrive gli scostamenti dell'osservazione Y_i da tale valore stimato; questi scostamenti sono imputabili a cause aleatorie e non controllabili, quali, ad esempio, errori di misura, dipendenze da variabili non considerate o valutazioni soggettive.

Ricavati i coefficienti γ_i , è possibile calcolare \hat{Y} stimato, come:

$$\hat{Y} = \frac{C}{1 + e^{\left(\gamma_1 \cdot \frac{A_w}{A_{env,oi}} + \gamma_2 \cdot U_{w,m} + \gamma_3 \cdot F_{sol} + \gamma_4 \cdot a_{sol} + \gamma_5 \cdot U_{op,m} + \gamma_6 \cdot K_{i,m} + \gamma_0 \right)}} \quad (3.16)$$

e Y osservato si relaziona a \hat{Y} stimato attraverso il residuo (E):

$$Y = \frac{C}{1 + e^{\left(\gamma_1 \cdot \frac{A_w}{A_{env,oi}} + \gamma_2 \cdot U_{w,m} + \gamma_3 \cdot F_{sol} + \gamma_4 \cdot a_{sol} + \gamma_5 \cdot U_{op,m} + \gamma_6 \cdot K_{i,m} + \gamma_0 \right)}} + E \quad (3.17)$$

Per stimare l'attendibilità del modello vengono calcolati alcuni coefficienti che sono funzione di indici degli scostamenti tra le osservazioni campionarie del carattere Y , la media di queste osservazioni e le loro stime tramite la regressione. Le stime delle osservazioni tramite la regressione si ottengono andando a risolvere l'Eq. (3.16) per tutte le osservazioni campionarie. Questi indici di scostamento sono:

- la devianza totale che si riferisce agli scostamenti tra le osservazioni Y_i e la loro media campionaria \bar{Y} ,
- la devianza spiegata che si riferisce agli scostamenti tra le stime \hat{Y}_i e la \bar{Y} ,
- la devianza dei residui che si riferisce agli scostamenti tra le osservazioni Y_i e le loro stime \hat{Y}_i .

Un coefficiente funzione di questi indici è R^2 : più questo indice è elevato (vicino a 1) più la funzione è rappresentativa; esso è definito come:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n=60} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n=60} (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.18)$$

Un altro coefficiente funzione degli indici degli scostamenti è l'*errore standard* (S.E.), che, essendo legato alla devianza dei residui, dovrebbe assumere un valore il più basso possibile se confrontato con la media campionaria delle osservazioni Y ; esso è definito come:

$$S.E. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=60} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}} \quad (3.19)$$

Infine, dovendo stabilire quali tra i vari caratteri esplicativi X_1, X_2, \dots, X_6 sono quelli che più influiscono sul carattere dipendente Y , occorre introdurre i *coefficienti di regressione standardizzati*. Un grado di incidenza delle singole variabili X_1, X_2, \dots, X_6 che si può considerare è dato dal valore di $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_6$ stesso; all'aumentare, in valore assoluto, di uno specifico γ_i si può infatti supporre che aumenti l'influenza di X_i nella determinazione di Y . Tuttavia, le stime dei coefficienti non sono confrontabili tra loro, poiché si riferiscono a caratteri con unità di misura differenti (i parametri "semi-empirici" hanno infatti unità di misura diverse) e con campi di variazione diversi. Per questo motivo vengono introdotte delle nuove stime dei coefficienti γ_i che sono insensibili alle scale utilizzate, e che sono appunto definiti *coefficienti di regressione standardizzati*. Essi sono definiti, per ogni variabile X_i , con $i = 1, 2$ fino a $i = 6$, come:

$$\beta_i = \gamma_i \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Y} \quad (3.20)$$

dove, σ_{X_i} è definito come:

$$\sigma_{X_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=60} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.21)$$

e σ_Y è definito come:

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=60} (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (3.22)$$

Considerati, ad esempio, due caratteri esplicativi X_1 e X_2 , si può affermare che X_1 è più importante di X_2 nel determinare il valore di Y se risulta $|\beta_1| > |\beta_2|$. Si considerano i valori assoluti perché un carattere è importante anche quando influisce negativamente su Y .

Di seguito vengono presentati i risultati dell'analisi di sensibilità per ciascun caso studio.

Edificio ad uso residenziale

Individuata la funzione (cfr. Eq. (3.14) che, tra quelle studiate, meglio rappresenta la relazione tra le variabili indipendenti (parametri “semi-empirici”, X_i) e la variabile dipendente (fabbisogno netto/potenza massima, Y), viene effettuata la regressione lineare multipla della variabile trasformata Y' (cfr. Eq. (3.15). Per l'edificio ad uso residenziale si assume la costante C pari a 31,2 kWh/m² quando la variabile dipendente è il fabbisogno netto di energia per il raffrescamento (Y_{fabb}), mentre C è pari a 150 W/m² quando la variabile dipendente è la potenza frigorifera massima (Y_{pot}).

Si riportano in Tabella 3.20 le osservazioni campionarie relative alle variabili indipendenti e alle variabili dipendenti Y_{fabb} e Y_{pot} , e le variabili trasformate Y'_{fabb} e Y'_{pot} .

Tabella 3.20 Variabili indipendenti e variabili dipendenti del campione (edificio ad uso residenziale).

Osservazioni	$A_w/A_{\text{env,oi}}$	$U_{w,m}$ [W/(m ² K)]	F_{sol} [-]	α_{sol} [-]	$U_{\text{op,m}}$ [W/(m ² K)]	$\kappa_{i,m}$ [kJ/(m ² K)]	Y_{fabb} [kWh/m ²]	Y'_{fabb} [-]	Y_{pot} [W/m ²]	Y'_{pot} [-]
1	0,07	2,40	0,70	0,3	0,29	29,9	2,99	2,24	15,0	2,20
2	0,27	2,45	0,70	0,3	0,10	28,9	22,96	-1,03	100,9	-0,72
3	0,27	0,73	0,48	0,9	0,10	61,5	9,72	0,79	31,3	1,33
4	0,14	0,75	0,59	0,6	0,89	62,4	6,45	1,34	21,0	1,82
5	0,07	0,76	0,59	0,9	0,81	24,4	6,23	1,39	22,9	1,71
6	0,27	0,73	0,59	0,3	0,79	23,8	19,18	-0,47	75,4	-0,01
7	0,27	5,52	0,82	0,3	0,29	27,6	18,25	-0,34	80,5	-0,15
8	0,14	5,41	0,71	0,6	0,89	31,8	3,21	2,16	16,3	2,11
9	0,07	0,76	0,59	0,3	0,85	30,5	1,83	2,78	13,0	2,35
10	0,07	0,76	0,54	0,6	0,30	27,8	3,01	2,24	11,9	2,45
11	0,14	5,41	0,71	0,9	0,29	16,7	4,11	1,89	22,0	1,76
12	0,27	5,52	0,82	0,6	0,88	32,1	17,11	-0,20	76,3	-0,03
13	0,14	5,41	0,71	0,9	0,84	30,3	5,23	1,60	21,5	1,79
14	0,14	5,41	0,71	0,9	0,10	16,8	3,60	2,04	20,7	1,83
15	0,07	5,33	0,71	0,9	0,10	29,8	2,20	2,58	10,0	2,64
16	0,27	5,52	0,82	0,9	0,80	23,9	19,33	-0,49	86,4	-0,31
17	0,14	2,42	0,62	0,3	0,29	16,7	2,91	2,27	17,9	2,00
18	0,14	2,42	0,62	0,9	0,89	31,8	5,94	1,45	18,8	1,94
19	0,07	5,33	0,71	0,3	0,89	62,5	0,27	4,74	4,3	3,53
20	0,27	5,52	0,82	0,9	0,10	62,5	23,30	-1,08	81,8	-0,18
21	0,27	2,45	0,53	0,6	0,79	23,9	5,22	1,60	28,4	1,46
22	0,27	0,73	0,59	0,3	0,10	28,4	24,14	-1,23	84,3	-0,25
23	0,14	5,41	0,82	0,6	0,10	29,5	7,94	1,07	33,5	1,25
24	0,14	0,75	0,54	0,6	0,29	16,7	5,05	1,64	22,2	1,75
25	0,27	0,73	0,48	0,9	0,29	28,9	9,46	0,83	39,0	1,05
26	0,27	2,45	0,53	0,9	0,88	32,1	6,73	1,29	28,4	1,45
27	0,07	2,40	0,61	0,3	0,29	63,0	1,11	3,29	6,7	3,06
28	0,07	0,76	0,59	0,6	0,10	61,8	4,28	1,84	12,5	2,40
29	0,07	2,40	0,61	0,3	0,10	29,1	1,78	2,80	8,8	2,77
30	0,27	5,52	0,61	0,6	0,10	28,4	4,68	1,73	28,5	1,45
31	0,27	0,73	0,48	0,3	0,79	23,8	6,56	1,32	36,8	1,12
32	0,07	5,33	0,82	0,9	0,29	29,9	5,01	1,65	20,3	1,85
33	0,07	2,40	0,70	0,9	0,29	28,0	4,89	1,68	19,3	1,91
34	0,27	2,45	0,53	0,3	0,29	29,0	4,64	1,74	26,2	1,55
35	0,07	0,76	0,59	0,6	0,30	27,8	4,35	1,82	16,4	2,10
36	0,14	0,75	0,54	0,6	0,30	61,9	4,84	1,69	15,1	2,19
37	0,14	2,42	0,70	0,6	0,29	29,6	6,80	1,28	28,4	1,46
38	0,07	2,40	0,61	0,6	0,89	62,5	1,84	2,77	8,1	2,87
39	0,27	2,45	0,70	0,3	0,10	62,5	22,66	-0,98	71,9	0,08
40	0,07	5,33	0,82	0,6	0,10	28,0	4,70	1,73	20,7	1,83
41	0,07	2,40	0,61	0,9	0,10	62,8	2,49	2,45	8,6	2,80
42	0,27	5,52	0,82	0,3	0,10	28,8	23,87	-1,18	115,3	-1,20

Osservazioni	$A_w/A_{env,oi}$	$U_{w,m}$ [W/(m ² K)]	F_{sol} [-]	α_{sol} [-]	$U_{op,m}$ [W/(m ² K)]	$\kappa_{i,m}$ [kJ/(m ² K)]	Y_{fabb} [kWh/m ²]	Y'_{fabb} [-]	Y_{pot} [W/m ²]	Y'_{pot} [-]
43	0,07	5,33	0,71	0,9	0,10	16,7	2,42	2,48	11,9	2,45
44	0,14	2,42	0,62	0,3	0,84	30,3	1,61	2,91	12,6	2,39
45	0,27	0,73	0,59	0,6	0,29	62,5	22,64	-0,97	64,3	0,29
46	0,07	2,40	0,61	0,9	0,85	30,7	4,70	1,73	16,8	2,07
47	0,07	0,76	0,59	0,6	0,89	63,7	3,79	1,98	12,9	2,36
48	0,14	2,42	0,70	0,6	0,10	62,7	7,63	1,13	23,4	1,69
49	0,27	0,73	0,48	0,6	0,30	61,6	8,82	0,93	30,0	1,39
50	0,07	0,76	0,54	0,9	0,10	29,1	3,21	2,17	11,4	2,50
51	0,27	5,52	0,61	0,3	0,83	29,7	3,17	2,18	24,4	1,64
52	0,07	2,40	0,70	0,6	0,29	16,6	4,17	1,87	20,7	1,83
53	0,14	0,75	0,59	0,3	0,89	62,4	3,86	1,96	16,9	2,06
54	0,14	2,42	0,70	0,6	0,30	28,0	7,21	1,20	30,6	1,36
55	0,14	0,75	0,59	0,9	0,29	62,8	8,52	0,98	23,6	1,68
56	0,14	5,41	0,71	0,3	0,89	63,6	0,89	3,53	8,9	2,77
57	0,14	2,42	0,62	0,6	0,89	63,6	3,23	2,16	12,3	2,42
58	0,27	0,73	0,59	0,3	0,10	28,8	24,11	-1,23	81,5	-0,17
59	0,14	2,42	0,70	0,3	0,10	61,7	7,26	1,19	22,3	1,74
60	0,14	5,41	0,82	0,9	0,29	62,9	8,05	1,05	26,3	1,55

La regressione lineare multipla della variabile trasformata Y' – realizzata mediante il software statistico “SPSS” – fornisce i valori dei coefficienti moltiplicativi γ , necessari per determinare il valore di R^2 e l'errore standard. Attraverso la valutazione di questi parametri è possibile individuare il livello di attendibilità del modello. Infatti, i coefficienti moltiplicativi γ permettono di calcolare i valori di Y stimati, ovvero \hat{Y} , come:

$$\hat{Y} = \frac{C}{1 + e^{\left(\gamma_1 \frac{A_w}{A_{env,oi}} + \gamma_2 \cdot U_{w,m} + \gamma_3 \cdot F_{sol} + \gamma_4 \cdot \alpha_{sol} + \gamma_5 \cdot U_{op,m} + \gamma_6 \cdot \kappa_{i,m} + \gamma_0 \right)}} \quad (3.23)$$

Vale la pena ricordare che la finalità dello studio non è quella individuare una funzione che sia in grado di predire, noti i valori dei parametri “semi-empirici”, l'entità del fabbisogno energetico, ma piuttosto individuare una funzione quanto più possibile corretta che permetta di identificare i parametri che maggiormente influenzano la prestazione termica estiva dell'edificio attraverso il valore dei coefficienti di regressione standardizzati (β_i).

Si riportano di seguito i risultati dell'analisi di sensibilità: in Tabella 3.21 sono indicati l' R^2 , l'errore standard (S.E.) e i coefficienti di regressione standardizzati per il fabbisogno energetico (Y_{fabb}); in Tabella 3.22 si riportano i valori degli stessi coefficienti per la potenza massima (Y_{pot}). In entrambe le tabelle si definisce, in funzione dei valori assunti dai coefficienti di regressione standardizzati (β_i), l'ordine di influenza dei parametri “semi-empirici” sulla prestazione energetica dell'edificio residenziale nel mese di luglio.

Tabella 3.21 Risultati dell'analisi di sensibilità per il fabbisogno netto specifico di energia per il raffrescamento (edificio ad uso residenziale).

S.E. = 1,8 kWh/m ² (con $\bar{Y} = 7,77$ kWh/m ²)		R ² = 0,93
Ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" su Y		β_i
1	F_{sol}	-0,989
2	$A_w/A_{env,oi}$	-0,898
3	$U_{w,m}$	0,873
4	α_{sol}	-0,223
5	$U_{op,m}$	0,108
6	$\kappa_{i,m}$	0,081

Tabella 3.22 Risultati dell'analisi di sensibilità per la potenza frigorifera specifica massima (edificio ad uso residenziale).

S.E. = 6 W/m ² (con $\bar{Y} = 31,3$ W/m ²)		R ² = 0,95
Ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" su Y		β_i
1	$A_w/A_{env,oi}$	-0,928
2	F_{sol}	-0,906
3	$U_{w,m}$	0,652
4	$\kappa_{i,m}$	0,197
5	α_{sol}	-0,087
6	$U_{op,m}$	0,039

I risultati dell'analisi di sensibilità evidenziano, in entrambi i casi, la buona affidabilità della funzione ipotizzata per studiare il fenomeno, sia per il valore elevato assunto da R^2 sia per il ridotto errore standard. Per ciò che riguarda invece l'obiettivo principale dello studio, per entrambe le forme assunte dalla variabile dipendente Y, si riscontra il peso ridotto del contributo della trasmittanza termica dell'involucro edilizio opaco ($U_{op,m}$) – e quindi del livello di isolamento termico – sulla prestazione energetica dell'edificio ad uso residenziale, a causa dell'elevata incidenza di altri fattori, quali i parametri termici e solari della superficie trasparente (F_{sol} e $U_{w,m}$) e l'estensione della stessa ($A_w/A_{env,oi}$). I parametri termici e solari della superficie opaca ($U_{op,m}$ e α_{sol}) occupano un ruolo di secondo piano sia per ciò che concerne il fabbisogno di energia netta sia per quanto riguarda la potenza frigorifera massima. Quest'ultima, in particolare, a differenza del fabbisogno energetico, è influenzata discretamente anche dalla capacità termica interna dell'edificio ($\kappa_{i,m}$).

Occorre, però, considerare che alla luce del fenomeno fisico che è alla base dell'analisi energetica di un edificio, il valore di $U_{op,m}$ non incide solo sulla quota di energia termica trasmessa attraverso l'involucro edilizio opaco per effetto della differenza di temperatura tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno, ma anche sull'entità degli apporti solari che entrano in ambiente attraverso l'involucro opaco stesso. Si consideri che nel caso studio in esame, la temperatura esterna mensile di luglio è mediamente più bassa della temperatura dell'ambiente interno, perciò la quota trasmessa attraverso l'involucro ha segno negativo, quindi realizza una diminuzione della domanda di energia per il raffrescamento, mentre gli apporti solari sono sempre positivi, ovvero contribuiscono all'incremento del fabbisogno energetico. Tuttavia, il segno assunto dal coefficiente di regressione

standardizzato β in riferimento a $U_{op,m}$ (cfr. Tabella 3.21 e Tabella 3.22) sta ad indicare che globalmente, alla diminuzione del valore della trasmittanza termica dell'involucro edilizio opaco – ovvero all'aumentare del livello di isolamento termico – aumenta sia il fabbisogno netto di energia per il raffrescamento sia la potenza frigorifera massima; quindi, generalizzando il fenomeno, si verifica un'incidenza maggiore dell'effetto che la trasmittanza termica ha sul flusso termico trasmesso per differenza di temperatura piuttosto che del suo effetto sugli apporti solari entranti in ambiente.

Alla luce di queste osservazioni viene effettuata un'altra analisi di sensibilità su altri parametri, ottenuti andando ad accorpare i parametri “semi-empirici” secondo i termini dell'equazione di bilancio energetico dell'edificio, al fine di poter studiare separatamente l'effetto del livello di isolamento sulla trasmissione termica dall'effetto dello stesso sugli apporti solari.

La funzione analizzata assume ora la seguente forma:

$$Y = \frac{C}{1 + e^{\sum \gamma_i Z_i + \gamma_0}} \quad (3.24)$$

dove con Z_i si indicano le nuove variabili indipendenti, definite come:

$$Z_1 = \frac{A_w}{A_f} \cdot U_{w,m} \quad (3.25)$$

$$Z_2 = \frac{A_w}{A_f} \cdot F_{sol} \quad (3.26)$$

$$Z_3 = \frac{A_{op}}{A_f} \cdot U_{op,m} \quad (3.27)$$

$$Z_4 = \frac{A_{op}}{A_f} \cdot U_{op,m} \cdot \alpha_{sol} \quad (3.28)$$

La relazione che sussiste tra le variabili indipendenti Z_i e la Y' trasformata di cui è effettuata la regressione lineare multipla è la seguente:

$$Y' = \gamma_1 \cdot Z_1 + \gamma_2 \cdot Z_2 + \gamma_3 \cdot Z_3 + \gamma_4 \cdot Z_4 + \gamma_0 \quad (3.29)$$

ovvero:

$$Y' = \frac{A_w}{A_f} \cdot (\gamma_1 \cdot U_{w,m} + \gamma_2 \cdot F_{sol}) + \frac{A_{op}}{A_f} \cdot (\gamma_3 \cdot U_{op,m} + \gamma_4 \cdot U_{op,m} \cdot \alpha_{sol}) + \gamma_0 \quad (3.30)$$

In questo caso la superficie d'involucro opaco (A_{op}) e la superficie d'involucro trasparente (A_w) sono considerate separatamente e normalizzate sulla superficie utile di pavimento (A_f); la superficie d'involucro complessiva, di cui al precedente rapporto $A_w/A_{env,oi}$, è pari a:

$$A_{\text{env,oi}} = A_w + A_{\text{op}} \quad (3.31)$$

L'Eq. (3.30) è evidentemente riconducibile all'equazione di bilancio termico dell'edificio, in cui i valori dei coefficienti moltiplicativi γ fornirebbero le mancanti informazioni relative alle condizioni climatiche (es. la differenza di temperatura in γ_3 e l'irradianza solare in γ_4) o alle sorgenti interne di calore e la ventilazione (es. in γ_0).

Data la ridotta incidenza della capacità termica interna dell'edificio sul fabbisogno energetico dello stesso, in questa analisi essa viene trascurata.

I valori dei coefficienti di regressione standardizzati (β_i), in questo caso, si ricavano come:

$$\beta_i = \gamma_i \cdot \frac{\sigma_{Z_i}}{\sigma_Y} \quad (3.32)$$

dove, σ_{Z_i} è definito come:

$$\sigma_{Z_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=60} (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \quad (3.33)$$

Si riportano in Tabella 3.23 i risultati dell'analisi di sensibilità: si definisce, in funzione dei valori assunti dai coefficienti di regressione standardizzati (β_i), l'ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" accorpati sul fabbisogno netto di energia per il raffrescamento dell'edificio residenziale nel mese di luglio.

Tabella 3.23 Risultati dell'analisi di sensibilità sviluppata accorpendo i parametri "semi-empirici" secondo l'equazione di bilancio energetico (edificio ad uso residenziale).

S.E. = 2,7 kWh/m ² (con $\bar{Y} = 7,77$ kWh/m ²)		$R^2 = 0,85$
Ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" accorpati su Y		β_i
1	$Z_2 = \frac{A_w}{A_f} \cdot F_{\text{sol}}$	-1,102
2	$Z_3 = \frac{A_{\text{op}}}{A_f} \cdot U_{\text{op,m}}$	0,615
3	$Z_4 = \frac{A_{\text{op}}}{A_f} \cdot U_{\text{op,m}} \cdot \alpha_{\text{sol}}$	-0,510
4	$Z_1 = \frac{A_w}{A_f} \cdot U_{\text{w,m}}$	0,438

Analizzando i risultati in Tabella 3.23 emerge, tra tutti i parametri costituenti i termini dell'equazione di bilancio energetico, il peso preponderante dei parametri solari del componente trasparente che determinano l'entità degli apporti solari in ambiente, il che conferma quanto rilevato precedentemente. In seconda istanza la prestazione energetica è influenzata dalla trasmissione

termica indotta dalla differenza di temperatura tra ambiente interno ed ambiente esterno che è legata alla trasmittanza termica dell'involucro opaco, ovvero dal livello di isolamento dello stesso. Un'influenza di poco inferiore al secondo termine è quella relativa agli apporti solari attraverso il componente opaco, determinati sia dalla trasmittanza termica sia dal coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna dell'involucro opaco; la diversificazione dell'influenza della trasmittanza termica sul fabbisogno energetico per termini del bilancio, caratterizzata dal segno opposto attribuito al coefficiente β nei due termini, è qui, rispetto alla precedente analisi, chiaramente evidenziata. Inoltre, si riscontra l'effetto limitato della trasmissione termica attraverso i componenti trasparenti sulla prestazione energetica, in contrapposizione a quanto rilevato precedentemente sull'influenza della trasmittanza termica dell'involucro trasparente (cfr. Tabella 3.21); questo è da ascrivere all'estensione della superficie trasparente che è più ridotta di quella dell'involucro opaco e che in quest'analisi, a differenza di quella precedente, non è classificata come parametro singolo, ma come fattore moltiplicativo della trasmittanza termica.

Edificio ad uso uffici

Per l'edificio ad uso uffici si assume la costante C pari a $8,08 \text{ kWh/m}^2$ per la variabile dipendente Y_{fabb} , e pari a 40 W/m^2 per la variabile dipendente Y_{pot} . Si riportano in Tabella 3.24 le osservazioni campionarie relative alle variabili indipendenti (parametri “semi-empirici”) e alle variabili dipendenti Y_{fabb} e Y_{pot} , e le variabili trasformate Y'_{fabb} e Y'_{pot} .

Tabella 3.24 Variabili indipendenti e variabili dipendenti del campione (edificio ad uso uffici).

Osservazioni	$A_w/A_{\text{env,oi}}$	$U_{w,m}$ [W/(m ² K)]	F_{sol} [-]	α_{sol} [-]	$U_{\text{op,m}}$ [W/(m ² K)]	$\kappa_{i,m}$ [kJ/(m ² K)]	Y_{fabb} [kWh/m ²]	Y'_{fabb} [-]	Y_{pot} [W/m ²]	Y'_{pot} [-]
1	0,12	2,38	0,70	0,3	0,30	28,1	4,35	-0,15	21,1	-0,11
2	0,28	2,42	0,70	0,3	0,10	35,0	5,88	-0,98	26,7	-0,69
3	0,28	0,75	0,57	0,9	0,10	63,7	5,71	-0,88	21,0	-0,10
4	0,17	0,76	0,59	0,6	0,91	63,7	4,78	-0,37	19,7	0,03
5	0,12	0,78	0,59	0,9	0,94	23,4	4,79	-0,38	22,3	-0,23
6	0,28	0,75	0,59	0,3	0,94	23,3	5,34	-0,67	25,9	-0,61
7	0,28	5,41	0,82	0,3	0,30	27,4	5,65	-0,84	28,4	-0,90
8	0,17	5,32	0,68	0,6	0,91	35,4	3,95	0,04	18,9	0,11
9	0,12	0,78	0,59	0,3	0,94	28,0	4,01	0,01	20,3	-0,03
10	0,12	0,78	0,57	0,6	0,29	34,8	4,47	-0,21	19,6	0,04
11	0,17	5,32	0,68	0,9	0,30	22,0	4,18	-0,07	20,5	-0,05
12	0,28	5,41	0,82	0,6	0,91	35,5	5,63	-0,83	26,7	-0,70
13	0,17	5,32	0,68	0,9	0,94	28,0	4,29	-0,12	20,4	-0,04
14	0,17	5,32	0,68	0,9	0,10	21,9	4,15	-0,05	20,5	-0,05
15	0,12	5,22	0,68	0,9	0,10	28,1	4,04	0,00	19,5	0,05
16	0,28	5,41	0,82	0,9	0,94	23,3	5,97	-1,04	30,3	-1,15
17	0,17	2,40	0,60	0,3	0,30	22,0	4,08	-0,02	19,7	0,03
18	0,17	2,40	0,60	0,9	0,91	35,4	4,47	-0,22	19,3	0,07
19	0,12	5,22	0,68	0,3	0,91	63,7	3,39	0,32	16,8	0,32
20	0,28	5,41	0,82	0,9	0,10	63,7	6,25	-1,23	24,4	-0,45
21	0,28	2,42	0,60	0,6	0,94	23,3	4,41	-0,18	21,3	-0,13

Osservazioni	$A_w/A_{env,oi}$	$U_{w,m}$ [W/(m ² K)]	F_{sol} [-]	α_{sol} [-]	$U_{op,m}$ [W/(m ² K)]	$\kappa_{i,m}$ [kJ/(m ² K)]	Y_{fabb} [kWh/m ²]	Y'_{fabb} [-]	Y_{pot} [W/m ²]	Y'_{pot} [-]
22	0,28	0,75	0,59	0,3	0,10	27,7	5,93	-1,02	26,4	-0,66
23	0,17	5,32	0,82	0,6	0,10	28,1	5,11	-0,54	24,6	-0,46
24	0,17	0,76	0,57	0,6	0,30	22,0	4,80	-0,38	21,5	-0,15
25	0,28	0,75	0,57	0,9	0,30	28,0	5,63	-0,83	23,5	-0,35
26	0,28	2,42	0,60	0,9	0,91	35,5	4,75	-0,36	20,1	-0,01
27	0,12	2,38	0,60	0,3	0,29	63,9	3,94	0,05	17,6	0,24
28	0,12	0,78	0,59	0,6	0,10	63,7	4,64	-0,30	19,1	0,09
29	0,12	2,38	0,60	0,3	0,10	27,8	4,06	-0,01	19,4	0,06
30	0,28	5,41	0,68	0,6	0,10	27,7	4,31	-0,14	20,6	-0,06
31	0,28	0,75	0,57	0,3	0,94	23,3	5,08	-0,53	23,5	-0,35
32	0,12	5,22	0,82	0,9	0,30	28,1	4,67	-0,31	22,3	-0,23
33	0,12	2,38	0,70	0,9	0,30	27,4	4,60	-0,28	21,8	-0,18
34	0,28	2,42	0,60	0,3	0,30	28,0	4,40	-0,18	20,2	-0,02
35	0,12	0,78	0,59	0,6	0,29	34,8	4,58	-0,27	20,5	-0,05
36	0,17	0,76	0,57	0,6	0,29	63,7	4,80	-0,38	19,2	0,08
37	0,17	2,40	0,70	0,6	0,30	28,1	4,84	-0,40	22,9	-0,29
38	0,12	2,38	0,60	0,6	0,91	63,7	3,89	0,08	17,3	0,27
39	0,28	2,42	0,70	0,3	0,10	63,7	5,88	-0,98	22,9	-0,29
40	0,12	5,22	0,82	0,6	0,10	34,7	4,68	-0,32	21,8	-0,18
41	0,12	2,38	0,60	0,9	0,10	63,7	4,16	-0,06	18,0	0,20
42	0,28	5,41	0,82	0,3	0,10	34,9	6,21	-1,20	29,4	-1,02
43	0,12	5,22	0,68	0,9	0,10	21,9	4,05	0,00	20,1	-0,01
44	0,17	2,40	0,60	0,3	0,94	28,0	3,69	0,17	18,8	0,12
45	0,28	0,75	0,59	0,6	0,29	63,9	5,81	-0,94	22,2	-0,22
46	0,12	2,38	0,60	0,9	0,94	28,2	4,29	-0,12	20,0	0,00
47	0,12	0,78	0,59	0,6	0,91	64,1	4,43	-0,19	18,8	0,12
48	0,17	2,40	0,70	0,6	0,10	63,7	4,98	-0,47	20,2	-0,02
49	0,28	0,75	0,57	0,6	0,29	63,7	5,53	-0,78	20,6	-0,06
50	0,12	0,78	0,57	0,9	0,10	27,8	4,56	-0,26	20,5	-0,05
51	0,28	5,41	0,68	0,3	0,94	27,9	3,82	0,11	20,0	0,00
52	0,12	2,38	0,70	0,6	0,30	22,0	4,48	-0,22	22,2	-0,22
53	0,17	0,76	0,59	0,3	0,91	63,7	4,42	-0,19	19,2	0,08
54	0,17	2,40	0,70	0,6	0,29	34,8	4,88	-0,42	22,1	-0,21
55	0,17	0,76	0,59	0,9	0,29	63,9	5,09	-0,53	20,1	-0,01
56	0,17	5,32	0,68	0,3	0,91	64,0	3,55	0,24	17,2	0,28
57	0,17	2,40	0,60	0,6	0,91	64,0	4,09	-0,02	17,6	0,24
58	0,28	0,75	0,59	0,3	0,10	28,0	5,93	-1,02	26,3	-0,66
59	0,17	2,40	0,70	0,3	0,10	63,7	4,94	-0,45	20,1	-0,01
60	0,17	5,32	0,82	0,9	0,29	63,9	5,10	-0,53	20,5	-0,05

Si riportano in Tabella 3.25 i risultati dell'analisi di sensibilità per il fabbisogno energetico (Y_{fabb}) e in Tabella 3.26 i risultati per la potenza massima (Y_{pot}).

Tabella 3.25 Risultati dell'analisi di sensibilità per il fabbisogno netto specifico di energia per il raffrescamento (edificio ad uso uffici).

S.E. = 0,23 kWh/m ² (con $\bar{Y} = 4,74$ kWh/m ²)		$R^2 = 0,89$
Ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" su Y		β_i
1	F_{sol}	- 0,869
2	$U_{w,m}$	0,746
3	$A_w/A_{env,oi}$	-0,687
4	α_{sol}	-0,206
5	$U_{op,m}$	0,163
6	$\kappa_{i,m}$	-0,043

Tabella 3.26 Risultati dell'analisi di sensibilità per la potenza frigorifera specifica massima (edificio ad uso uffici).

S.E. = 1,19 W/m ² (con $\bar{Y} = 21,38$ W/m ²)		$R^2 = 0,84$
Ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" su Y		β_i
1	F_{sol}	-0,957
2	$U_{w,m}$	0,606
3	$A_w/A_{env,oi}$	-0,530
4	$\kappa_{i,m}$	0,385
5	α_{sol}	-0,025
6	$U_{op,m}$	-0,003

L'analisi di sensibilità per l'edificio ad uso uffici parte dalla consapevolezza che il fattore che, in prima istanza, influenza maggiormente la prestazione termica estiva dell'edificio è rappresentato dalle sorgenti interne di calore. Lo scopo è quindi individuare quale parametro, in seconda istanza, tra quelli legati all'involucro incide maggiormente e, soprattutto, quanto incide la trasmittanza termica dell'involucro opaco in questo caso.

Dall'analisi dei risultati riportati in Tabella 3.25 e in Tabella 3.26 emerge la buona affidabilità, anche più elevata rispetto all'edificio residenziale, della funzione ipotizzata per studiare il fenomeno, sia nel valore elevato assunto da R^2 sia nel ridotto errore standard. Anche in questo caso e per entrambe le forme assunte dalla variabile dipendente Y, si riscontra l'influenza ridotta del contributo del livello di isolamento termico dell'involucro edilizio opaco ($U_{op,m}$) sulla prestazione energetica dell'edificio, e parallelamente l'elevata incidenza dei parametri termici e solari della superficie trasparente (F_{sol} e $U_{w,m}$) e l'estensione della stessa ($A_w/A_{env,oi}$). Inoltre, occorre sottolineare che la ridotta variabilità del fabbisogno di energia netta per il raffrescamento e della potenza frigorifera massima, entrambi riferiti alla superficie utile di pavimento, riscontrabile in Tabella 3.24 per il campione analizzato, sia legata al peso determinante delle sorgenti termiche interne che qui, trattandosi di un confronto tra altri parametri, non sono percepibili, ma contribuiscono in egual misura e in maniera preponderante in tutte le osservazioni campionarie a determinare la prestazione.

Anche per l'edificio ad uso uffici, come per l'edificio residenziale, sono accorpati i parametri "semi-empirici" secondo i termini dell'equazione di bilancio energetico dell'edificio e viene effettuata l'analisi di sensibilità sulle nuove variabili. Si riportano in Tabella 3.27 i risultati.

Tabella 3.27 Risultati dell'analisi di sensibilità sviluppata accorpando i parametri "semi-empirici" secondo l'equazione di bilancio energetico (edificio ad uso uffici).

S.E. = 0,29 kWh/m ² (con $\bar{Y} = 4,74$ kWh/m ²)		$R^2 = 0,84$
Ordine di influenza dei parametri "semi-empirici" accorpati su Y		β_i
1	$Z_2 = \frac{A_w}{A_f} \cdot F_{sol}$	-0,981
2	$Z_3 = \frac{A_{op}}{A_f} \cdot U_{op,m}$	0,644
3	$Z_4 = \frac{A_{op}}{A_f} \cdot U_{op,m} \cdot \alpha_{sol}$	-0,462
4	$Z_1 = \frac{A_w}{A_f} \cdot U_{w,m}$	0,386

La stessa gerarchia di influenza dei termini del bilancio di energia sul fabbisogno per il raffrescamento nel mese di luglio individuata per l'edificio residenziale (cfr. Tabella 3.23) si ripropone anche per l'edificio ad uso uffici.

3.3.5. Effetti dell'isolamento termico sulla prestazione termica estiva

I risultati dell'analisi di sensibilità per l'edificio ad uso residenziale hanno mostrato la ridotta influenza della trasmittanza termica dell'involucro opaco sulla prestazione energetica estiva dell'edificio, sebbene l'involucro nel suo complesso, come rilevato nel grafico di Figura 3.39, determini un contributo fondamentale sulla domanda energetica per il raffrescamento. Il livello di isolamento termico dell'involucro opaco sembra quindi essere poco determinante ai fini della definizione sia del fabbisogno energetico dell'edificio sia della potenza frigorifera massima. Ciò è dovuto all'elevato contributo dell'involucro trasparente, in prima istanza per effetto degli apporti solari delle superfici vetrate (in presenza e in assenza della schermatura solare) e dell'entità dimensionale dei serramenti, e secondariamente per effetto della dispersione termica attraverso i serramenti stessi.

Si consideri, ad esempio, il grafico rappresentato in Figura 3.41, in cui il contributo dell'involucro opaco è relazionato al contributo dell'involucro trasparente sulla prestazione energetica nel mese di luglio, in riferimento al campione dei sessanta casi rappresentativi analizzati. Dal grafico si evince che nel 90% dei casi il peso dell'involucro trasparente è superiore a quello dell'involucro opaco nella determinazione del comportamento termico estivo dell'edificio residenziale.

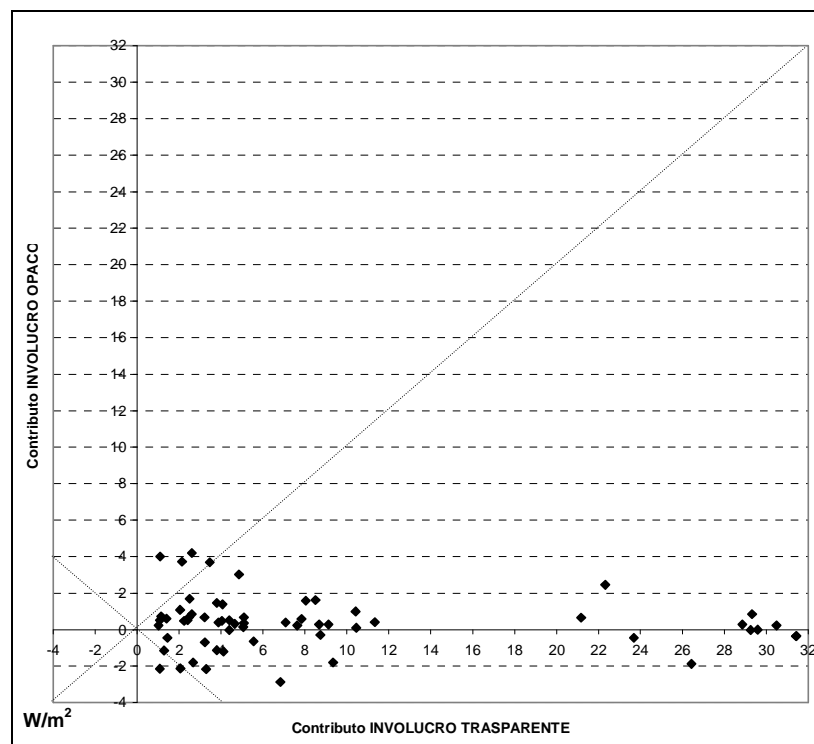


Figura 3.41 Relazione tra il contributo dell'involucro opaco e il contributo dell'involucro trasparente al carico termico medio mensile (luglio) per il campione analizzato, in riferimento all'edificio ad uso residenziale.

A partire dal grafico rappresentato in Figura 3.41 è possibile effettuare ulteriori considerazioni. Un'elaborazione della rappresentazione del contributo involucro opaco/trasparente sulla prestazione energetica estiva dell'edificio residenziale è riportata nel grafico di Figura 3.42, in cui i casi analizzati sono distinti in relazione al parametro che rappresenta l'estensione della superficie trasparente. Osservando il grafico è possibile individuare una certa tendenza: all'aumentare della superficie trasparente aumenta mediamente anche il contributo dell'involucro trasparente sul fabbisogno di energia per il raffrescamento dell'edificio. Inoltre, il contributo dell'involucro opaco diventa significativo nella determinazione della prestazione energetica estiva solo nella situazione in cui si riduce l'estensione dei serramenti: infatti, solo i punti colorati di rosso (casi con superfici vetrate ad estensione ridotta) tendono ad allontanarsi dall'asse delle ascisse in maniera più significativa rispetto agli altri punti. Ovviamente queste osservazioni non sono generalizzabili per il fatto che sul contributo dell'involucro trasparente non incide solo l'entità della superficie, ma anche i parametri termici e solari della stessa, come emerso dall'analisi di sensibilità.

All'interno del grafico di Figura 3.42 sono poi individuati alcuni "casi particolari", contrassegnati con le lettere da "A" a "D", sui quali è opportuno avanzare alcune osservazioni.

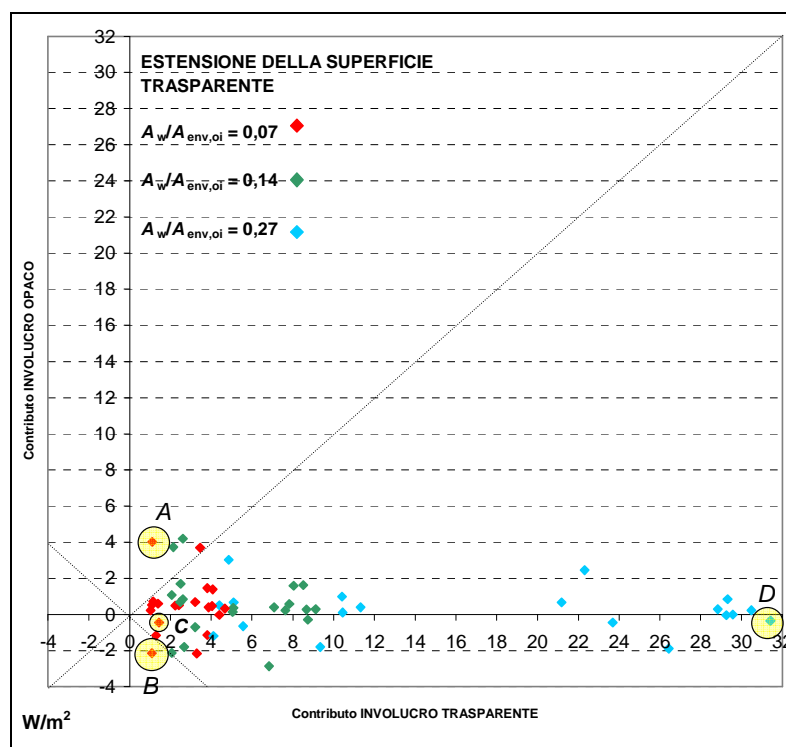


Figura 3.42 Relazione tra il contributo dell'involucro opaco e il contributo dell'involucro trasparente al carico termico medio mensile (luglio) in funzione dell'estensione della superficie vetrata e individuazione di "casi particolari" ("A", "B", "C" e "D") per il campione analizzato, in riferimento all'edificio ad uso residenziale.

Il “caso particolare” individuato con la lettera “A” è riferito all’osservazione n. 46 in Tabella 3.20, quello che fra tutti i casi analizzati presenta un peso maggiore dell’involucro opaco sul fabbisogno di energia per il raffrescamento. Questo è dovuto alla presenza di una superficie trasparente di ridotta ampiezza e schermata, e alla presenza di un involucro opaco non isolato che determina un aumento del flusso termico trasmesso per effetto della temperatura esterna. Il contributo dell’involucro opaco è però di segno positivo, ovvero determina un aumento del carico frigorifero, da ascrivere al valore elevato del coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna (scura) che causa un aumento degli apporti solari attraverso i componenti d’involucro opachi (cfr. Figura 3.43).

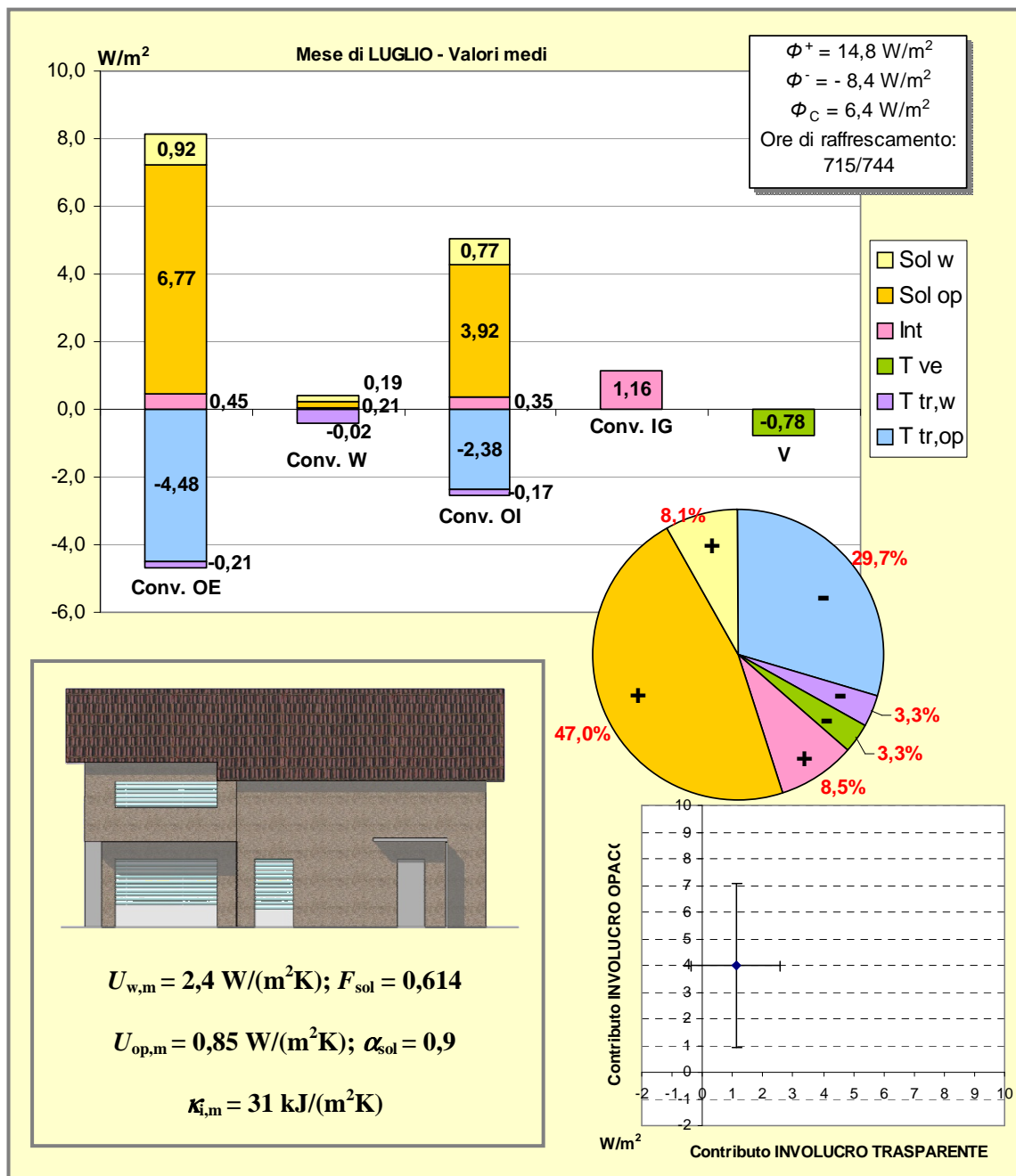


Figura 3.43 “Caso particolare” (“A”) n. 46 in Tabella 3.20. Caratterizzazione dell’edificio e risultati dell’analisi energetica effettuata secondo la metodologia d’indagine presentata al capitolo 2.

Il secondo “caso particolare” (“B”), corrispondente al n. 19 in Tabella 3.20, è quello che fra tutti i casi analizzati presenta la migliore prestazione energetica estiva. A parità di apporti interni e tasso di ventilazione, questa variante è caratterizzata da un involucro trasparente di ridotta ampiezza e opportunamente schermato, e da un involucro opaco non isolato e caratterizzato da un’elevata capacità termica. Pur essendo molto simile al precedente (“A”), in questo caso varia il coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna, che corrisponde ad un colore chiaro. Questo fa sì che si riducano gli apporti solari attraverso l’involucro opaco e, di conseguenza, il fabbisogno di energia per il raffrescamento (circa il 93,8% rispetto al caso precedente).

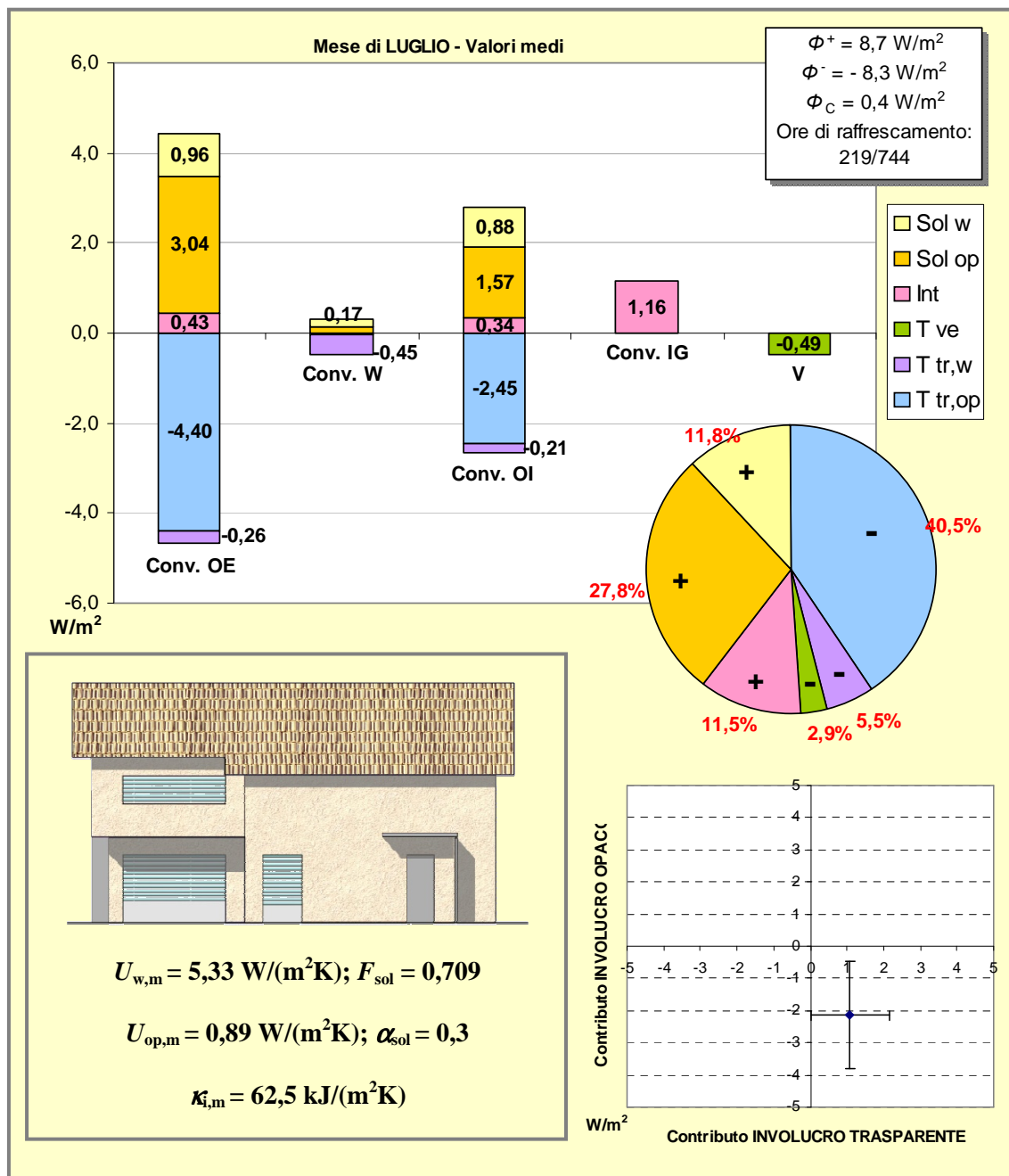


Figura 3.44 “Caso particolare” (“B”) n. 19 in Tabella 3.20.

Il terzo “caso particolare” (“C”), relativo al n. 29 in Tabella 3.20, è riferito ad un edificio altamente isolato che presenta una discreta prestazione termica estiva. Tuttavia, il raggiungimento di questo livello di prestazione, molto adeguato se confrontato con la media del campione analizzato, non è ottenuto solo per effetto dell’elevato livello di isolamento termico, ma è dovuto principalmente alla presenza del livello più basso sia dell’estensione della superficie vetrata, che è opportunamente schermata, sia del coefficiente di assorbimento solare della superficie opaca (chiaro).

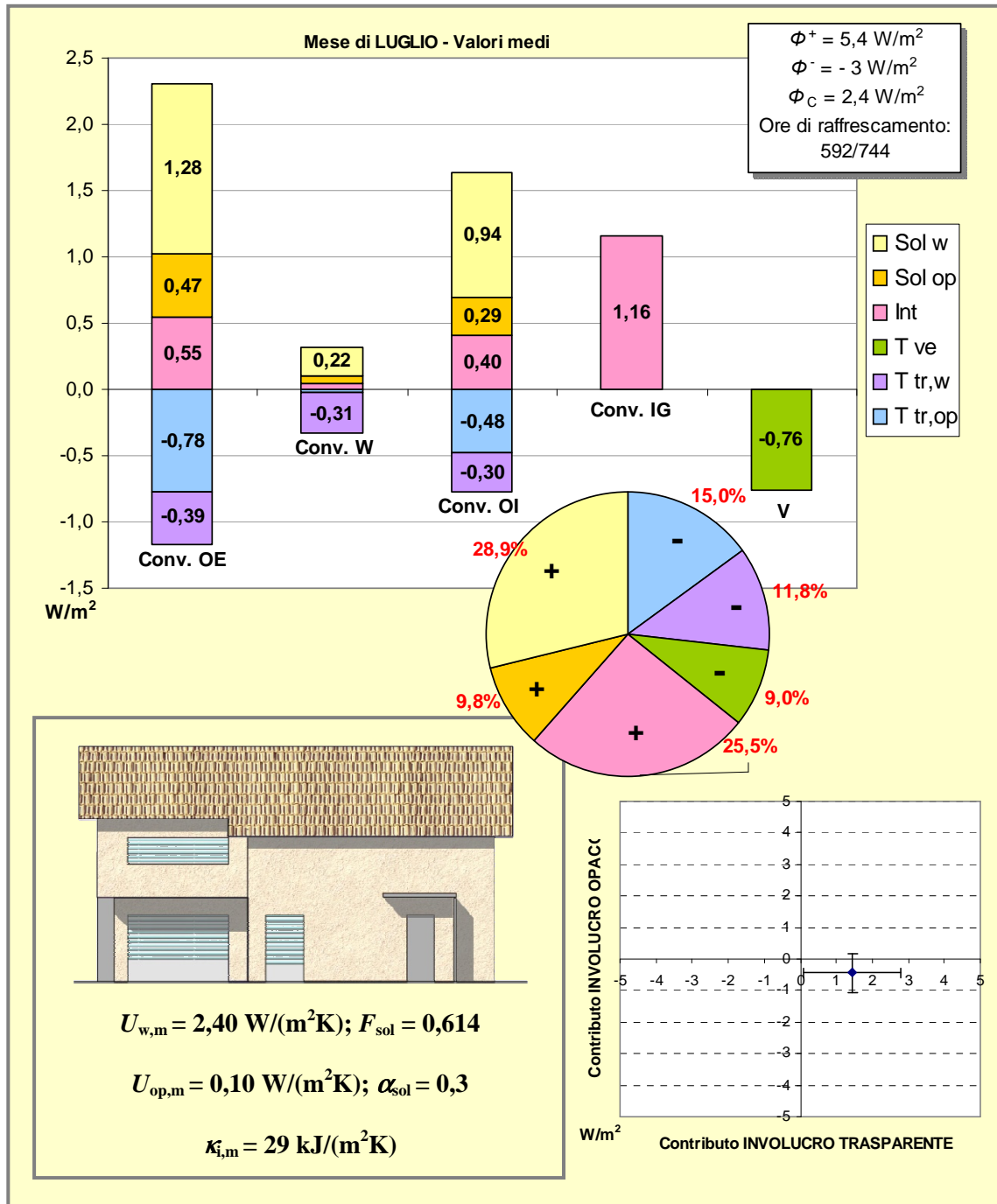


Figura 3.45 “Caso particolare” (“C”) n. 29 in Tabella 3.20.

Il caso studio (“D”), caratterizzato, invece, dal livello più elevato del carico frigorifero nel mese di luglio all’interno del campione analizzato, è quello corrispondente al n. 58 in Tabella 3.20. L’elevato livello di isolamento termico è ininfluente rispetto al peso delle superfici d’involucro trasparente, che determinano un contributo dell’84,3% al carico frigorifero, rappresentato dagli apporti solari entranti in ambiente attraverso le superfici vetrate. Ancora una volta si confermano i risultati dell’analisi di sensibilità in riferimento all’influenza maggiore dei parametri correlati all’involucro trasparente sulla prestazione energetica estiva dell’edificio residenziale.

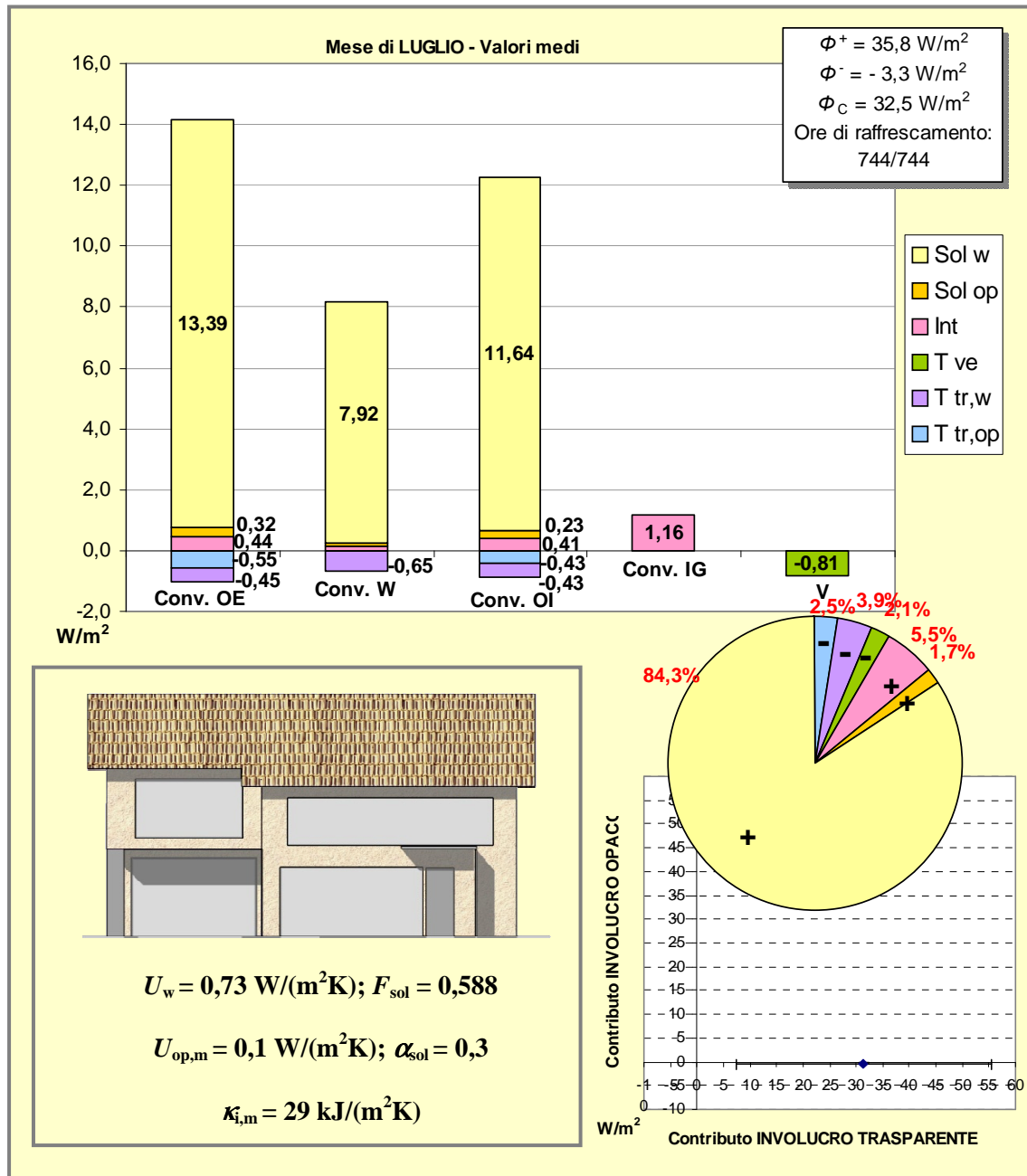


Figura 3.46 “Caso particolare” (“D”) n. 58 in Tabella 3.20.

Sebbene sia dimostrata la ridotta influenza del livello di isolamento termico dell'involucro edilizio opaco nella determinazione della prestazione energetica dell'edificio residenziale a causa dell'insorgere di altri fattori, risulta comunque interessante studiare il comportamento energetico dell'edificio altamente isolato per la sua diffusione oggi sempre più marcata sul territorio nazionale (un chiaro riferimento è rappresentato dalle “case passive” o agli edifici ad “energia zero” o ad “energia positiva”).

La condizione che ammetterebbe l'uso di questa tecnologia, per non compromettere la prestazione termica estiva – si pensi al “caso particolare” in Figura 3.45 in cui solo attraverso l’“abbattimento” dei parametri di maggior influenza si consentirebbe l'utilizzo dell'iper-isolamento termico – risiede in un corretto dimensionamento e posizionamento delle superfici vetrate, prevedendo la corretta schermatura solare delle stesse. Tuttavia, pur ammettendo l'uso dell'isolante termico, non bisogna sacrificare la scelta di una superficie trasparente adeguata. Per questo motivo occorrerebbe mettere in atto anche altre strategie, finalizzate alla riduzione dei carichi interni; prime fra tutte si annovera il *free cooling*, ovvero l'aumento del tasso di ventilazione naturale quando le condizioni esterne lo consentono. Il capitolo 4 ne riporta un esempio, applicato ad una casa passiva.

Una relazione significativa tra la prestazione energetica estiva e il livello di isolamento termico risiede nel valore del coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna opaca. Il grafico in Figura 3.47 illustra, per l'edificio residenziale oggetto di studio, questa relazione, che è ottenuta fissando gli altri parametri ad un valore tale da renderli meno influenti sulla prestazione stessa:

- estensione della superficie trasparente, $A_w/A_{env,ois}$, pari a 0,07;
- trasmittanza termica media della superficie trasparente, $U_{w,m}$, pari a 2,4 W/(m² K);
- parametro solare della superficie trasparente, F_{sol} , pari a 0,61;
- capacità termica interna dell'edificio, $\kappa_{i,m}$, pari a 62 kJ/(m² K).

Analizzando la Figura 3.47 si evince che, prevedendo una superficie esterna trattata con colore chiaro, all'aumentare del livello di isolamento termico il fabbisogno energetico aumenta, perché, avendo ridotto la trasmittanza termica, si riduce il contributo con segno negativo al carico dovuto all'effetto della temperatura esterna sul flusso termico trasmesso attraverso l'involucro opaco, e questa riduzione è più elevata rispetto alla diminuzione degli apporti solari in ambiente per effetto della stessa trasmittanza termica. Se si utilizza un trattamento di colore medio sulla superficie esterna opaca (con α_{sol} pari a 0,6), la prestazione energetica risulta invariata al variare del livello di isolamento termico, mentre, in presenza di valori elevati del coefficiente di assorbimento solare, risulta vantaggioso isolare termicamente, in quanto ad una diminuzione della trasmittanza termica dell'involucro opaco dell'88% corrisponde una riduzione del fabbisogno netto di energia per il raffrescamento di circa il 50%.

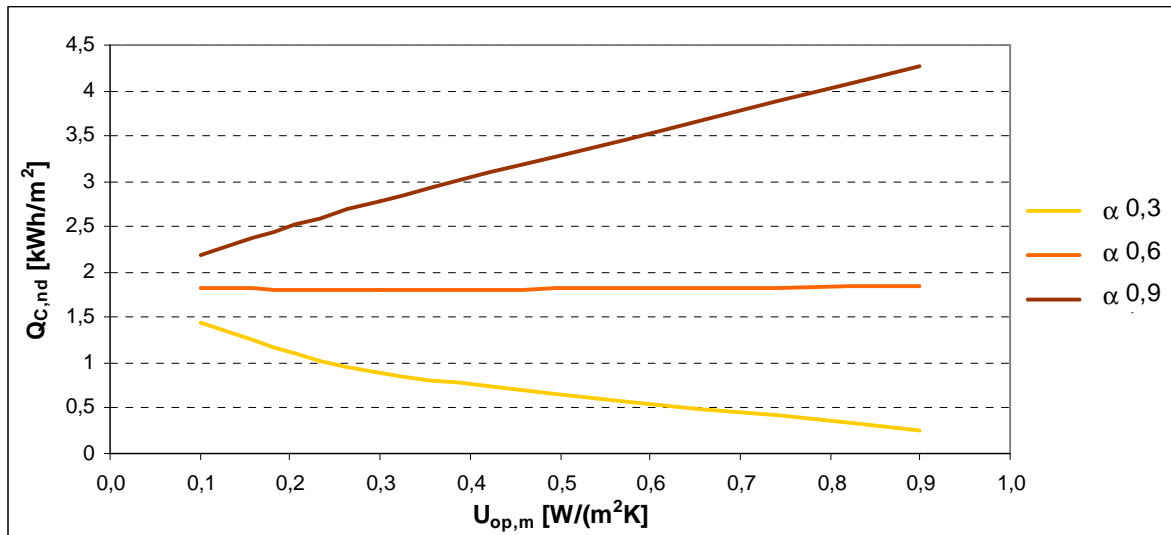


Figura 3.47 Relazione tra il livello di isolamento termico dell'involucro opaco e la prestazione energetica estiva dell'edificio residenziale in funzione del coefficiente di assorbimento solare della superficie opaca esterna (colore).

Per quanto riguarda l'edificio ad uso uffici, data l'elevata influenza degli apporti interni di calore, e, in seconda istanza, dei parametri termici e solari dell'involucro trasparente, non si rivela interessante studiare l'effetto dell'isolamento termico come avvenuto per l'edificio residenziale. Per quest'ultimo, solo riducendo il contributo dell'involucro trasparente è stato possibile avanzare alcune considerazioni in merito all'effetto del livello di isolamento termico sulla prestazione termica estiva dell'edificio. La stessa analisi potrebbe essere effettuata anche sull'edificio ad uso uffici, ma a condizione di ridurre il peso delle sorgenti interne di calore; quest'operazione, tuttavia, non è ammessa perché il contributo delle sorgenti interne è determinato dall'uso ed è un dato fissato a priori. Solo ipotizzando un altro profilo d'uso e una diversa entità delle sorgenti interne di calore si potrebbe ampliare l'analisi, ma questo implicherebbe l'individuazione di un nuovo caso studio caratterizzato probabilmente da una destinazione d'uso completamente differente.

4. Estensione dello studio ad un edificio passivo

Nel presente capitolo la metodologia d'indagine è estesa allo studio di un edificio reale caratterizzato dall'iper-isolamento delle strutture d'involucro, una casa passiva in costruzione nella provincia di Modena. L'obiettivo non è quello di verificare la rispondenza del progetto allo *Standard Passivhaus*, ma piuttosto di determinarne la prestazione energetica estiva e, utilizzando la modalità di analisi termica proposta, proporre un'ottimizzazione progettuale relativa alla prestazione termica estiva dell'edificio.

4.1. La casa passiva di Carpi

4.1.1. Descrizione dell'edificio

L'edificio è una residenza monofamiliare in fase di costruzione nel comune di Carpi (Modena); il progetto dell'edificio segue i canoni specifici di una casa passiva, finalizzati all'ottenimento di un'elevata prestazione energetica, sia nella stagione di riscaldamento sia nel periodo di raffrescamento.

Poiché l'analisi riguarda il solo fabbisogno di energia netta per il raffrescamento, la descrizione dell'edificio si concentra sull'illustrazione delle caratteristiche dell'involucro, tralasciando le specifiche relative all'impianto termico.



Figura 4.1 Immagine tridimensionale della casa passiva di Carpi.

L'edificio, rappresentato in Figura 4.1 e geometricamente affine all'edificio residenziale utilizzato per lo sviluppo dell'analisi parametrica nel capitolo 3, è una villa isolata a due piani fuori terra: il piano terra ospita la zona giorno (cucina, sala da pranzo, soggiorno, vani tecnici; cfr. Figura

4.2); al primo piano sono collocate due camere da letto, due bagni ed un ripostiglio (cfr. Figura 4.3). Il primo piano è in parte soppalcato e il soggiorno è a doppia altezza (cfr. Figura 4.4).

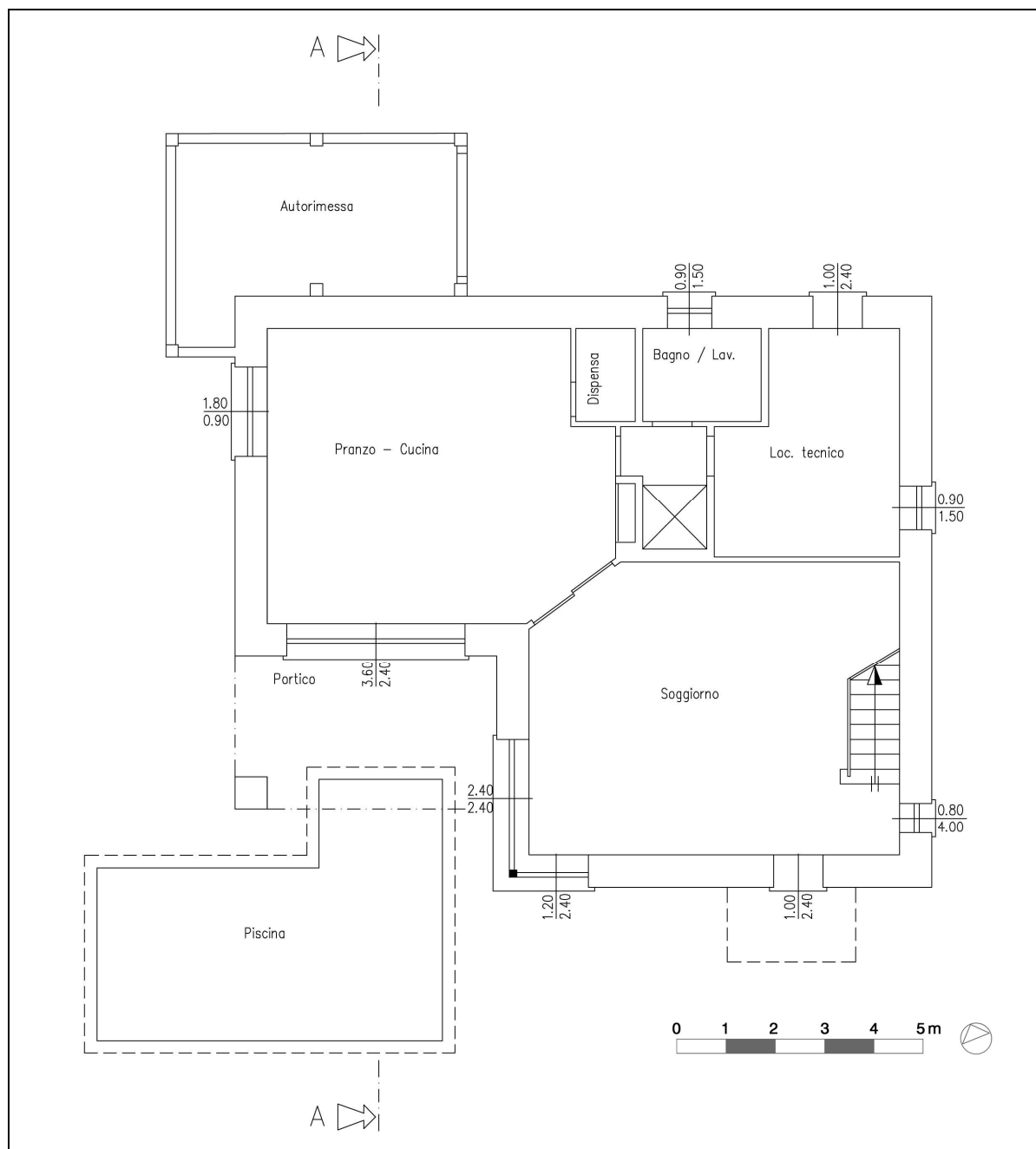


Figura 4.2 Pianta del piano terreno della casa passiva di Carpi.

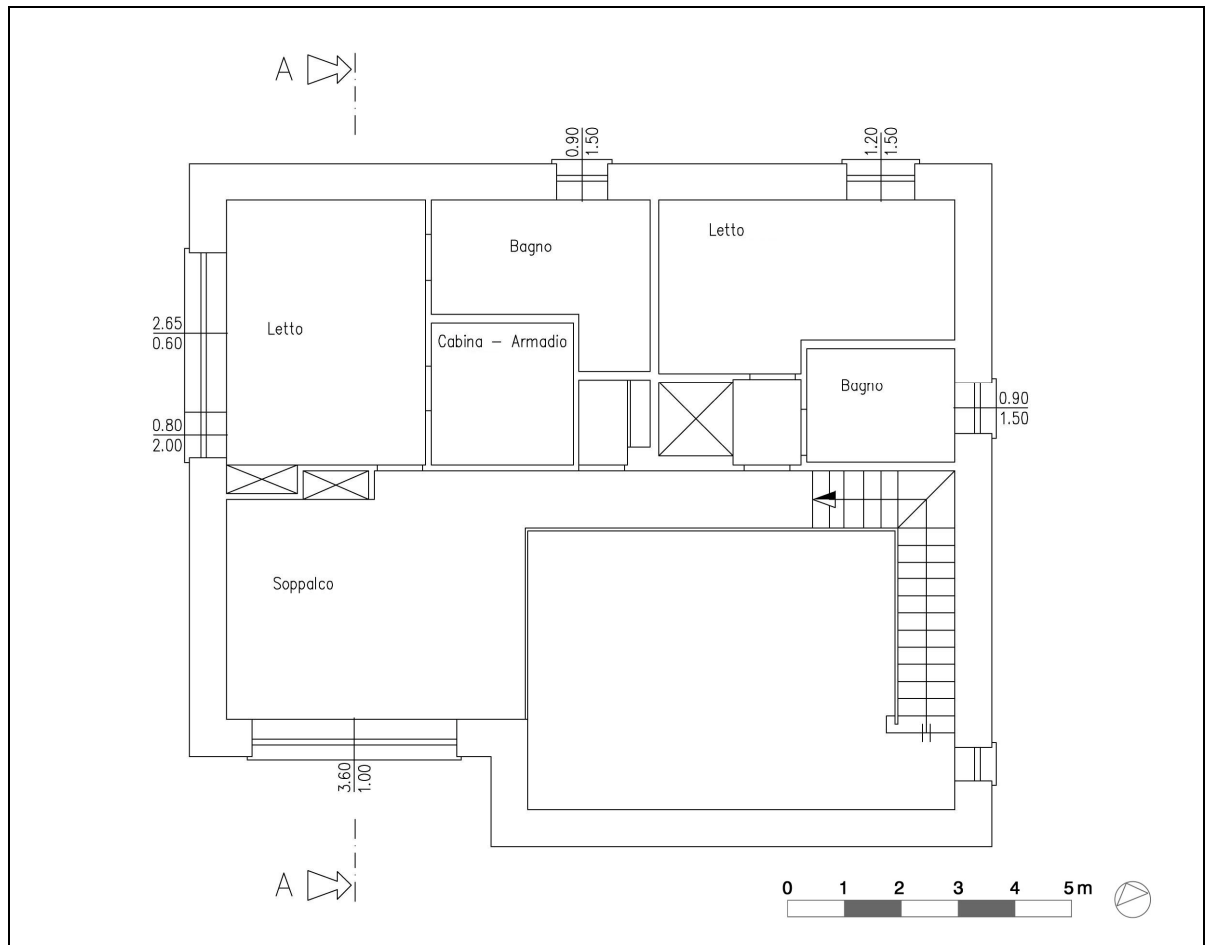


Figura 4.3 Pianta del primo piano della casa passiva di Carpi.

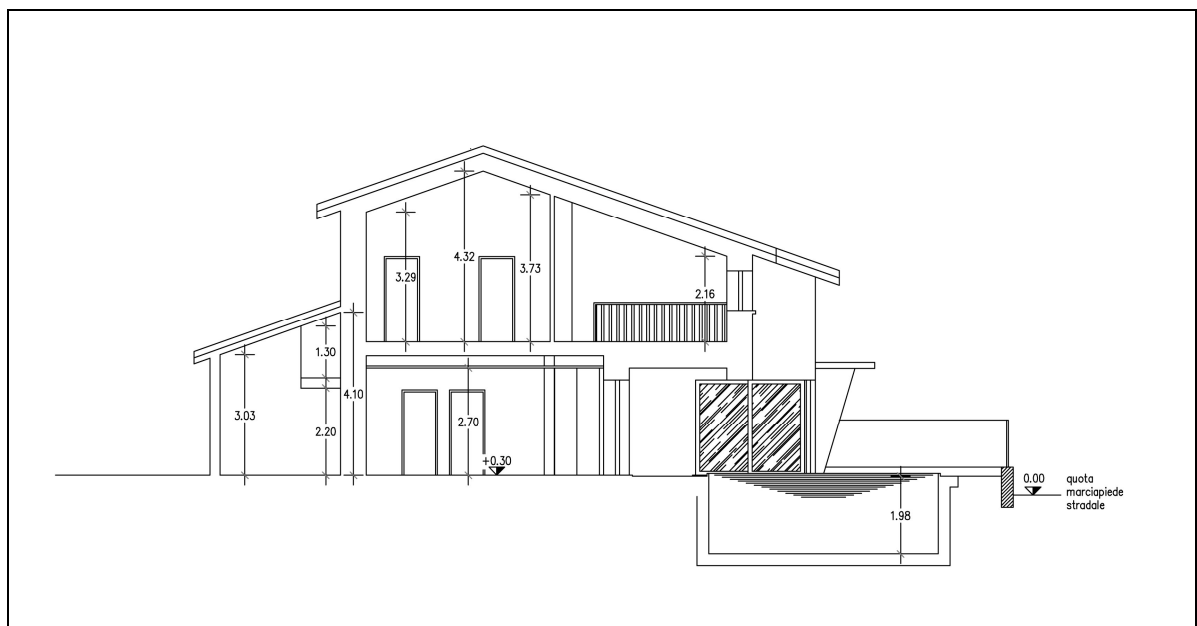
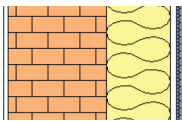
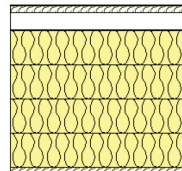
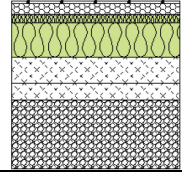
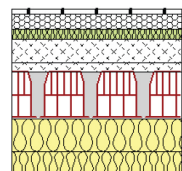


Figura 4.4 Sezione verticale (A-A, secondo l'indicazione nelle piante) della casa passiva di Carpi.

I principali dati tipologici e dimensionali dell'edificio sono riportati in Tabella 4.1, dove sono

altresì rappresentate le stratigrafie dei componenti opachi dell'involucro edilizio con l'elenco dei principali parametri prestazionali delle chiusure verticali ed orizzontali.

Tabella 4.1 Dati tipologico-dimensionali e parametri termo-fisici dei componenti d'involucro edilizio opaco della casa passiva di Carpi.

DATI TIPOLOGICO-DIMENSIONALI					
A_f [m ²]	192,42	V_n [m ³]	758	A_w/A_{env}	0,05
A_w [m ²]	37,3	V_g [m ³]	1191	A_w/A_f	0,19
A_{env} [m ²]	710	A_{env}/V_g [m ⁻¹]	0,60	A_{env}/A_f	3,69
DATI COSTRUTTIVI					
COMPONENTI D'INVOLUCRO			PARAMETRI TERMO-FISICI		
Chiusura verticale opaca			s [cm]		66
			U [W/(m ² K)]		0,091
E			$s_{ins}^{(*)}$ [cm]		24
			m_s [kg/m ²]		300
Chiusura orizzontale superiore			s [cm]		50
			U [W/(m ² K)]		0,084
			$s_{ins}^{(*)}$ [cm]		40
			m_s [kg/m ²]		66
Chiusura orizzontale su terreno			s [cm]		98
			U [W/(m ² K)]		0,083
			$s_{ins}^{(**)}$ [cm]		25
			m_s [kg/m ²]		1055
Chiusura orizzontale su esterno			s [cm]		72
			U [W/(m ² K)]		0,093
			$s_{ins}^{(*)}$ [cm]		29
			m_s [kg/m ²]		594
(*) Il materiale isolante è lana di roccia, avente massa volumica pari a 70 kg/m ³ (pareti e solaio su esterno) e 100 kg/m ³ (solaio di copertura).					
(**) Il materiale isolante è poliuretano espanso, avente massa volumica pari a 35 kg/m ³ .					

L'involucro trasparente è costituito da doppi serramenti con interposta schermatura solare a veneziana; la parte trasparente del serramento esterno è una vetrata singola, la vetrata interna è tripla con trattamento basso-emissivo e intercapedini in gas krypton. Il telaio è in legno di abete e alluminio; le camere metalliche sono riempite da schiuma poliuretanica. Il valore della trasmittanza termica media dei serramenti è pari a 0,69 W/(m² K) e il fattore solare del pacchetto vetrato è pari a 0,60.

4.1.2. Analisi della prestazione energetica estiva

Per la valutazione energetica della casa passiva, non avendo a disposizione i dati climatici di Carpi, si sono applicati i dati climatici della città di Bologna, utilizzando il file climatico orario "G.

De Giorgio (IGDG)”. La prestazione termica estiva dell’edificio oggetto di studio è ricavata in riferimento al mese di luglio. Dall’analisi dei risultati in Figura 4.5 si evince che il raffrescamento risulta attivo per quasi la totalità del mese di luglio (724 ore) e che il fabbisogno energetico netto mensile è pari a $2,94 \text{ kWh/m}^2$; inoltre, le quote che incidono maggiormente sulla domanda di energia frigorifera sono rappresentate dagli apporti solari attraverso i componenti d’involucro trasparente e dagli apporti interni.

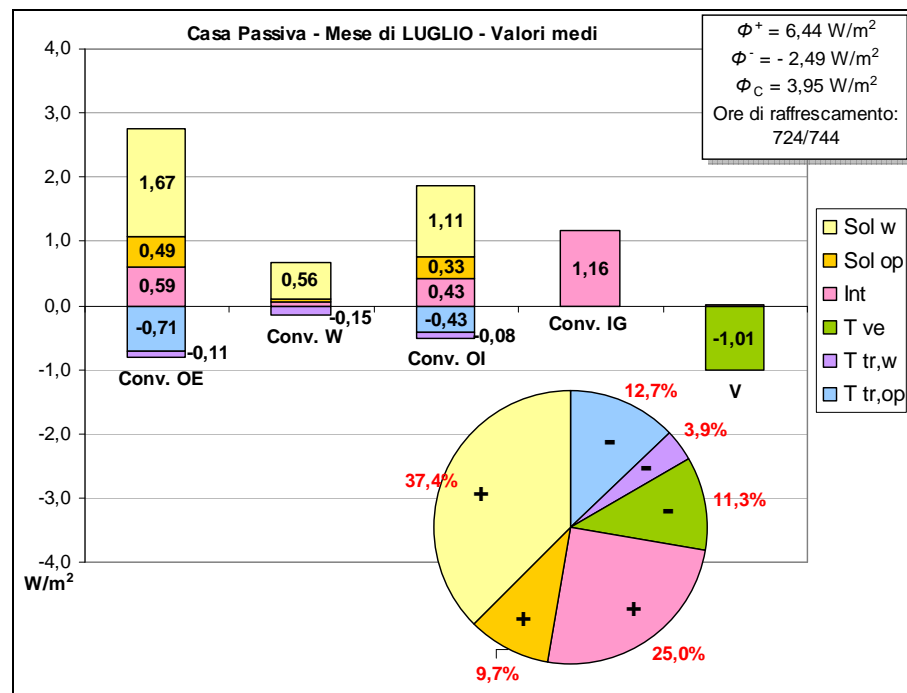


Figura 4.5 Valore medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni termiche e contributo percentuale di ciascuna sollecitazione sul fabbisogno di energia per il raffrescamento (luglio).

In Figura 4.6 viene rappresentata la deviazione standard delle stesse grandezze sopra analizzate. L’analisi dello scarto quadratico medio è un utile strumento per identificare le criticità sulle variazioni del carico, allo scopo di individuare soluzioni adeguate per ridurre i picchi frigoriferi. La rappresentazione permette di caratterizzare il livello di inerzia termica della struttura in relazione ai diversi termini del bilancio convettivo sull’aria interna. Dall’analisi dei risultati, si evince che la quota caratterizzata da una maggiore deviazione dal valore medio è il flusso convettivo delle sorgenti di calore interne e il flusso termico relativo alla ventilazione. Poiché entrambi i termini non sono legati all’involucro, e oltretutto costituiscono un contributo convettivo diretto sull’aria interna, non permettono un’ottimizzazione progettuale. Le sorgenti termiche sono infatti dipendenti dall’uso dell’edificio, stabilito a priori, e la ventilazione è direttamente correlata alla temperatura dell’aria esterna, a meno del tasso di ricambio d’aria che potrebbe essere assunto quale dato di progetto.

Altro parametro caratterizzato da una elevata deviazione standard è l’apporto solare entrante attraverso l’involucro trasparente: in questo caso l’ottimizzazione progettuale potrebbe riguardare la

modalità d'utilizzo delle schermature solari e, in particolare, la scelta del sistema di schermatura. Si potrebbero prediligere, ad esempio, schermature posizionate all'esterno e non in intercapedine, come nel caso in esame, facendo sì che la radiazione solare venga captata prima che essa possa riscaldare la vetrata e determinare quindi un aumento del flusso termico convettivo scambiato tra la superficie interna del vetro e l'aria ambiente. Il risultato andrebbe ad incidere sia sul carico frigorifero medio mensile, sia sulla potenza massima.

Per quanto riguarda, invece, l'involucro opaco, la variazione estremamente limitata del flusso termico convettivo dipende dall'elevata capacità termica delle strutture d'involucro che si aggiunge all'iper-isolamento termico.

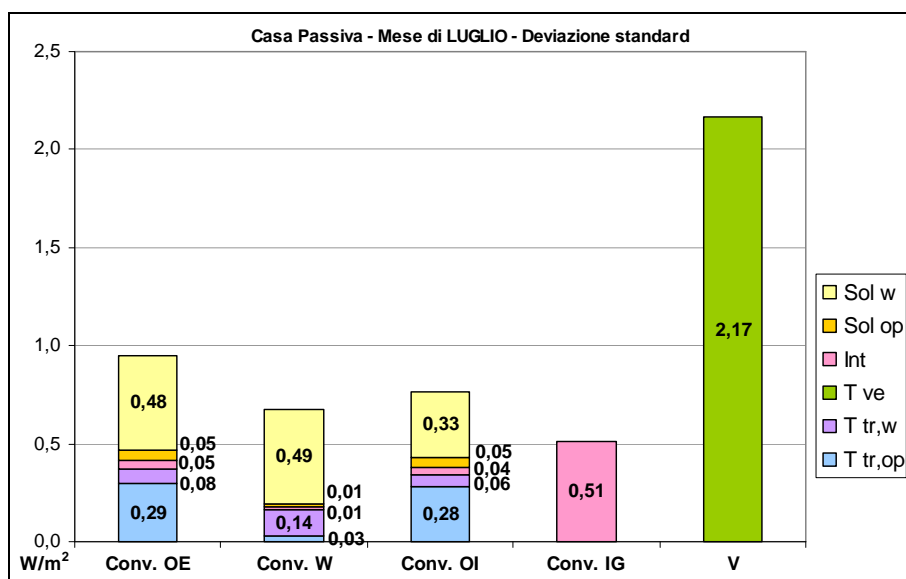


Figura 4.6 Scarto quadratico medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni dinamiche della casa passiva (luglio).

L'involucro contribuisce al riscaldamento dell'aria interna principalmente per effetto dell'assorbimento dell'energia solare che entra in ambiente attraverso le superfici trasparenti: per questo motivo il contributo al carico termico medio dei termini del bilancio legati all'involucro è maggiore rispetto al contributo dei termini non legati all'involucro, come indicato in Figura 4.7. Tuttavia, la quota del bilancio dell'aria interna legata all'effetto della temperatura esterna (cfr. Figura 4.5) è limitata, a causa dell'iper-isolamento delle strutture d'involucro opaco; questo fa sì che il contributo dell'involucro opaco nella determinazione della prestazione energetica estiva sia meno influente rispetto a quello dell'involucro trasparente. Lo scambio termico è negativo (dispersione termica) perché la temperatura esterna è mediamente più bassa rispetto alla temperatura interna.

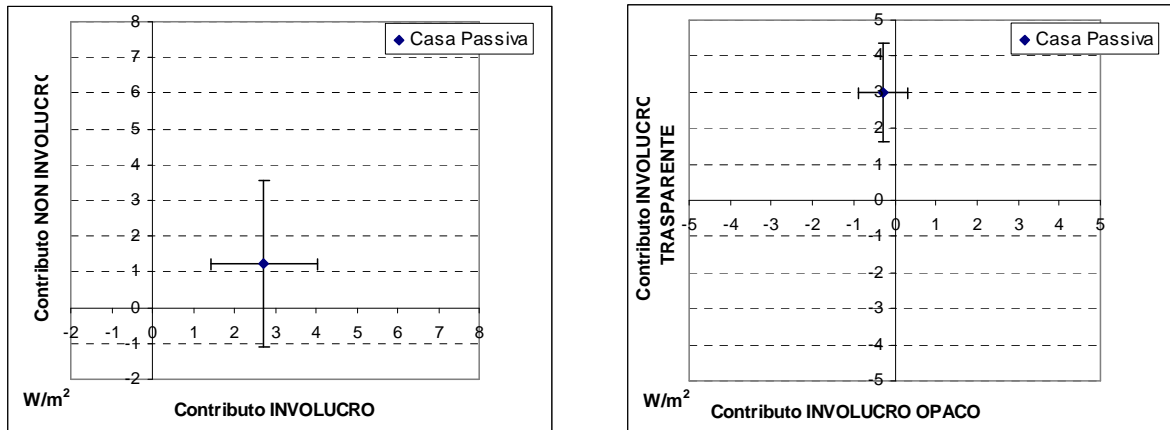


Figura 4.7 Relazione tra il contributo dei termini del bilancio non legati all'involucro e il contributo di quelli legati all'involucro sulla prestazione termica estiva della casa passiva (a sinistra); relazione tra il contributo dei termini del bilancio legati all'involucro opaco e il contributo di quelli legati all'involucro trasparente sulla prestazione termica estiva della casa passiva (a destra).

4.1.3. Differenti assunzioni nei dati d'ingresso

Nel presente paragrafo, prima di proporre un'ottimizzazione progettuale della casa passiva, viene sviluppata un'ulteriore analisi. Si ipotizza di applicare condizioni al contorno differenti rispetto a quelle utilizzate nel caso reale, per indagare come varia la prestazione energetica estiva dell'edificio nei seguenti casi:

- differente utilizzo dell'edificio che prevede un incremento degli apporti termici interni;
- diversa localizzazione dell'edificio.

Nel primo caso si ipotizza un profilo di utilizzo coincidente con quello riportato nel prospetto 9 della specifica tecnica UNI/TS 11300-1 e in Figura 3.5; il valore medio mensile degli apporti interni è superiore a quello considerato nell'analisi ed è più vicino al valore ricavabile dai prospetti della UNI EN ISO 13790 per gli "Apartment blocks" (cfr. anche par. 3.1.1). Nel secondo caso si ipotizza di localizzare l'edificio a Palermo.

Aumento degli apporti termici interni

I risultati della prestazione energetica dell'edificio passivo considerando un incremento degli apporti interni sono riportati in Figura 4.8; ad un raddoppio degli apporti interni in valore medio corrisponde un incremento del 71% della potenza media richiesta nel mese di luglio per il raffrescamento. Inoltre, il contributo maggiore al fabbisogno estivo di energia è ora rappresentato dalle sorgenti interne di calore.

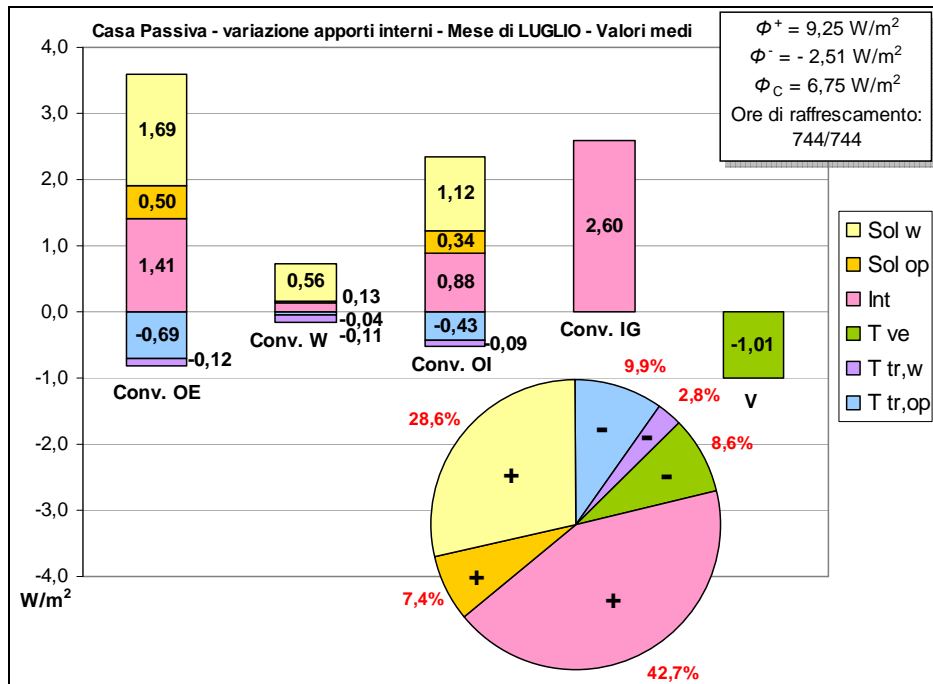


Figura 4.8 Valore medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni termiche, considerando un incremento degli apporti interni, e contributo percentuale di ciascuna sollecitazione sul fabbisogno di energia per il raffrescamento (luglio).

Dall'analisi dello scarto quadratico medio dei carichi in Figura 4.9 emerge, rispetto al caso base, l'aumento della deviazione relativa alle sorgenti interne di calore.

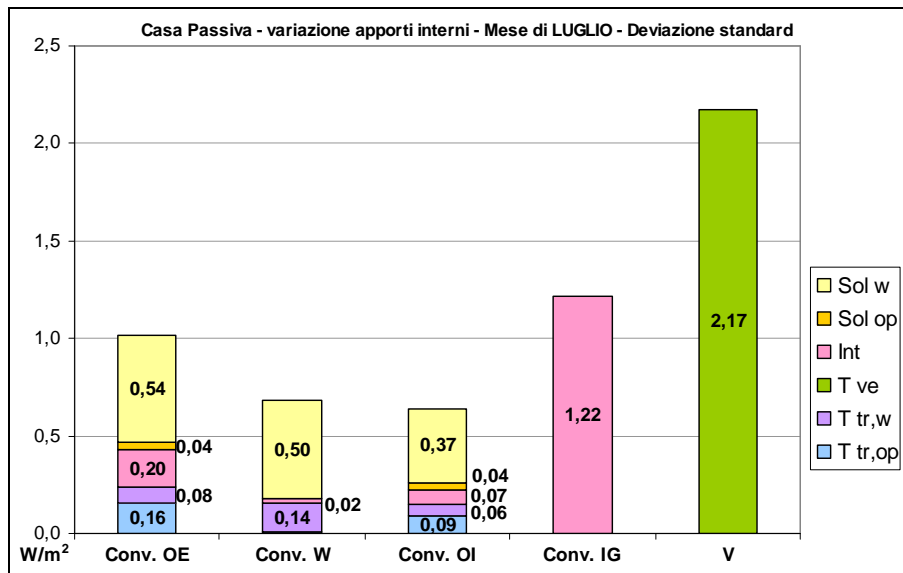


Figura 4.9 Scarto quadratico medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni dinamiche della casa passiva, considerando un incremento degli apporti interni.

Parallelamente, poiché il contributo maggiore al carico medio mensile è ora rappresentato dalle sorgenti interne di calore, il contributo dei termini del fabbisogno frigorifero dell'edificio non legati

all'involucro supera il contributo di quelli legati all'involucro, come rappresentato in Figura 4.10.

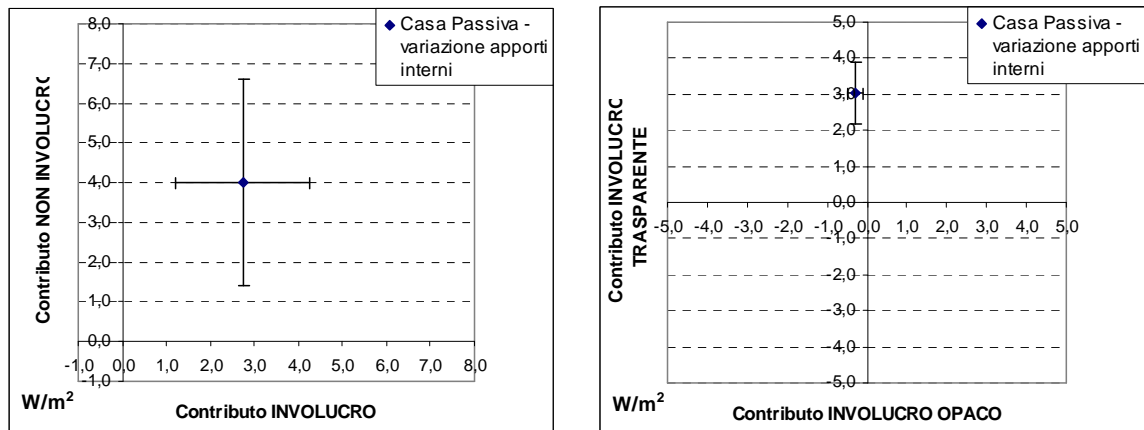


Figura 4.10 Relazione tra il contributo dei termini del bilancio non legati all'involucro e il contributo di quelli legati all'involucro sulla prestazione termica estiva della casa passiva (a sinistra); relazione tra il contributo dei termini del bilancio legati all'involucro opaco e il contributo di quelli legati all'involucro trasparente sulla prestazione termica estiva della casa passiva (a destra). Caso riferito all'incremento degli apporti interni.

I risultati conseguenti alla variazione del caso base con aumento degli apporti termici interni dimostrano come sia determinante, ai fini dell'analisi energetica estiva, la tipologia di occupazione. L'entità degli apporti termici interni, fissata in questo studio a priori secondo valori convenzionali riportati nella normativa tecnica, potrebbe condurre a risultati molto diversi qualora si considerasse un'utenza reale il cui comportamento si discostasse molto da quello "standard".

Diversa localizzazione dell'edificio

Una seconda variazione al modello della casa passiva riguarda la diversa localizzazione dell'edificio, da Bologna a Palermo. Si riportano in Figura 4.11 i risultati dell'analisi energetica effettuata per Palermo con il file climatico orario "IWEC". Dal grafico, se posto a confronto con quello di Figura 4.5, si evince un aumento della potenza media di raffrescamento nel mese di luglio da ascrivere soprattutto alla riduzione del flusso termico trasmesso attraverso l'involucro per effetto della temperatura esterna, e della quota relativa alla ventilazione. La causa è legata al valore della temperatura dell'aria esterna che a Palermo è mediamente più elevato che a Bologna; si riduce in questo modo l'effetto positivo di limitazione del carico interno generato dai termini del bilancio energetico legati alla temperatura esterna. Rispetto all'edificio sito a Bologna, a Palermo il fabbisogno di energia per il raffrescamento aumenta del 27% e il carico di segno negativo (Φ^-) si riduce del 53%.

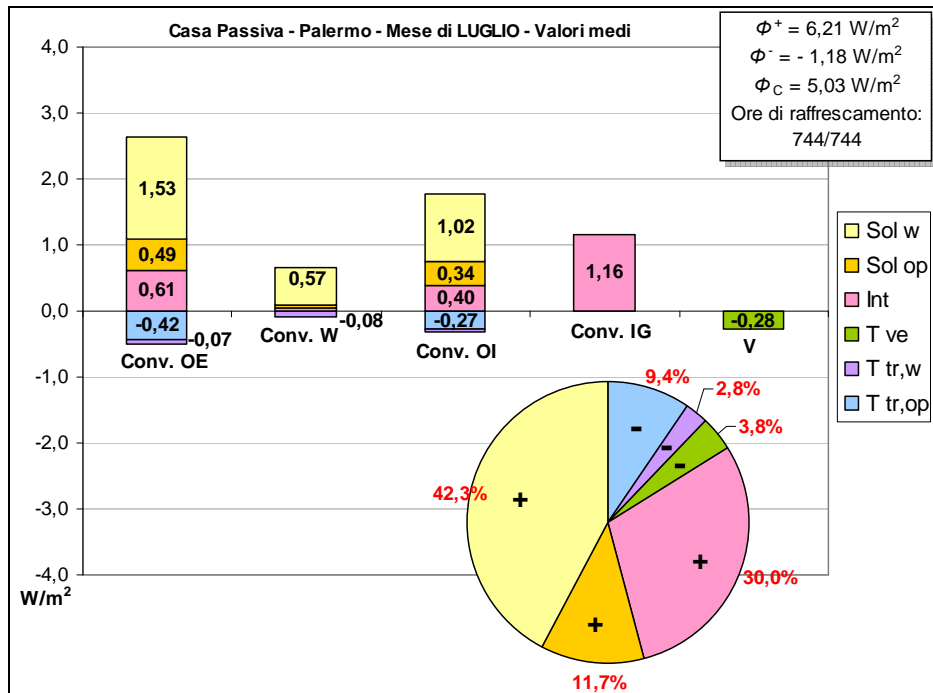


Figura 4.11 Valore medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni termiche, considerando la localizzazione a Palermo, e contributo percentuale di ciascuna sollecitazione sul fabbisogno di energia per il raffrescamento (luglio).

In Figura 4.12 si riporta lo scarto quadratico medio dei termini del bilancio in relazione alle sollecitazioni termiche dinamiche dell'ambiente esterno e dell'ambiente interno; rispetto al caso di Bologna, a Palermo si riduce la deviazione standard della quota legata alla ventilazione. Infatti, essendo costante a 26°C il valore della temperatura interna poiché le ore di raffrescamento coincidono con le ore del mese di luglio (cfr. Figura 4.11), la causa della limitata deviazione dal valore medio del contributo della ventilazione è da ascrivere alla ridotta escursione termica della temperatura dell'aria esterna a Palermo.

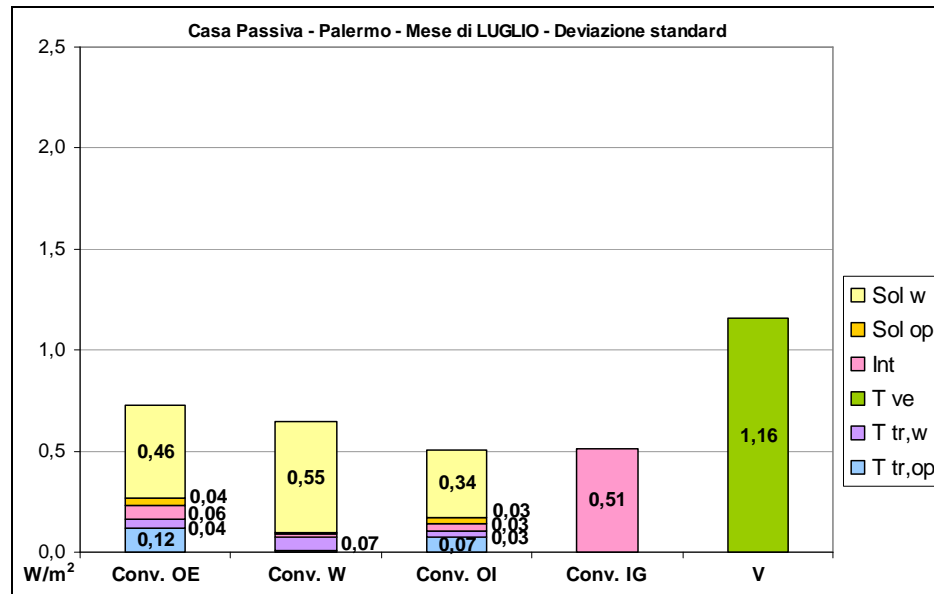


Figura 4.12 Scarto quadratico medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni dinamiche della casa passiva, considerando la sua localizzazione a Palermo.

In questo caso, il contributo maggiore al carico frigorifero medio dell'edificio a Palermo è sempre rappresentato dai termini legati all'involucro; tuttavia si verifica un cambiamento di segno per ciò che riguarda il contributo dell'involucro opaco. Infatti, mentre a Bologna la quota delle dispersioni termiche attraverso l'involucro opaco supera quella degli apporti solari attraverso l'involucro opaco stesso, a Palermo gli apporti solari acquistano un peso maggiore, proprio a causa della riduzione delle dispersioni termiche.

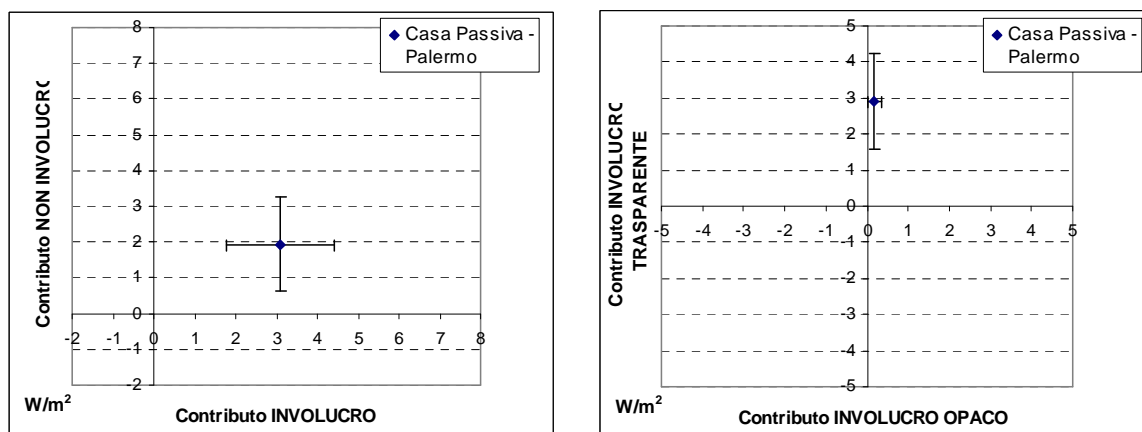


Figura 4.13 Relazione tra il contributo dei termini del bilancio non legati all'involucro e il contributo di quelli legati all'involucro sulla prestazione termica estiva della casa passiva (a sinistra); relazione tra il contributo dei termini del bilancio legati all'involucro opaco e il contributo di quelli legati all'involucro trasparente sulla prestazione termica estiva della casa passiva (a destra). Caso riferito alla localizzazione dell'edificio a Palermo.

4.2. Una proposta di ottimizzazione della prestazione energetica della casa passiva

L'analisi dei risultati della prestazione termica della casa passiva evidenzia una soddisfacente prestazione energetica estiva. Tuttavia è possibile porre in atto alcune misure per migliorare ulteriormente la prestazione energetica, soprattutto considerando un'eventuale collocazione dell'edificio in climi più caldi (es. Palermo).

La scelta delle strategie è effettuata alla luce dei risultati dell'analisi termica della casa passiva nella sua forma progettuale: in vista di una riduzione del carico interno, si propone di incrementare la ventilazione naturale, non potendosi variare gli apporti interni – fissati dalla destinazione d'uso – e non modificando la tecnologia d'involucro, essendo questa determinata da motivazioni progettuali non legate solamente al tema energetico.

Si propone di attivare il *free cooling* attraverso un incremento del tasso di ventilazione, dal valore precedentemente fissato nell'analisi, a 2 h^{-1} nelle ore del mese di luglio in cui la temperatura dell'aria esterna è inferiore alla temperatura dell'aria interna. La strategia scelta è in linea con quanto illustrato al par. 1.2.3 in riferimento alle strategie passive di riduzione dei carichi interni.

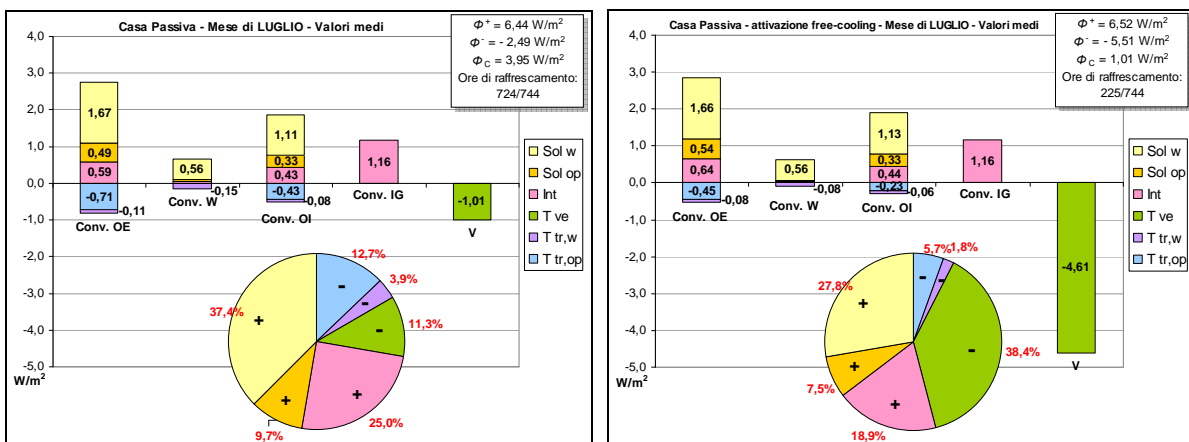


Figura 4.14 Confronto dei valori medi dei termini del bilancio termico e del contributo percentuale di ciascuna sollecitazione sul fabbisogno di energia (luglio) della casa passiva tra la situazione originaria e la condizione di attivazione del *free cooling*.

In Figura 4.14 si riporta il confronto tra i risultati dell'analisi termica della casa passiva nella situazione originaria e nella situazione conseguente all'attivazione del *free cooling* (a Bologna). La potenza frigorifera media del mese di luglio passa da $3,95 \text{ W/m}^2$ a $1,01 \text{ W/m}^2$, riducendosi di circa il 74%, e le ore di raffrescamento si riducono a 225, che corrisponde al 30% delle ore totali mensili. L'attivazione della ventilazione naturale, prevalentemente notturna, produce una diminuzione del carico termico a seguito dell'aumento del contributo al carico con segno negativo (Φ^-); in particolare, all'aumento considerevole della dispersione termica per ventilazione, si contrappone una

leggera riduzione della trasmissione termica attraverso l'involucro a seguito della diminuzione della temperatura dell'aria interna determinata dal *free cooling*.

La maggiore deviazione dal valore medio dei carichi, secondo il grafico in Figura 4.15, si riscontra in prima istanza nel termine relativo alla ventilazione e, secondariamente, nel flusso termico riferito alla trasmissione termica dell'involucro opaco. Questo secondo aspetto è da ascrivere alla variabilità della differenza di temperatura interno-esterno legata all'elevata variabilità della temperatura dell'aria interna per effetto dell'aumento della ventilazione naturale.

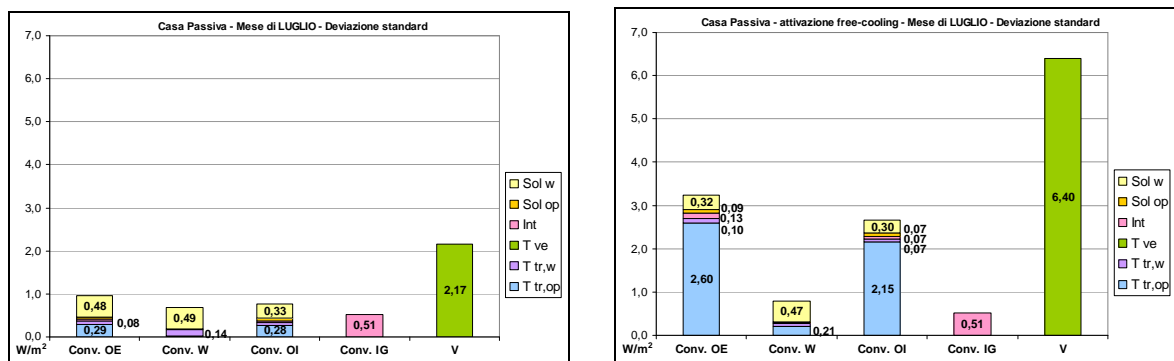


Figura 4.15 Confronto dello scarto quadratico medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni dinamiche della casa passiva tra la situazione originaria e la condizione di attivazione del *free cooling*.

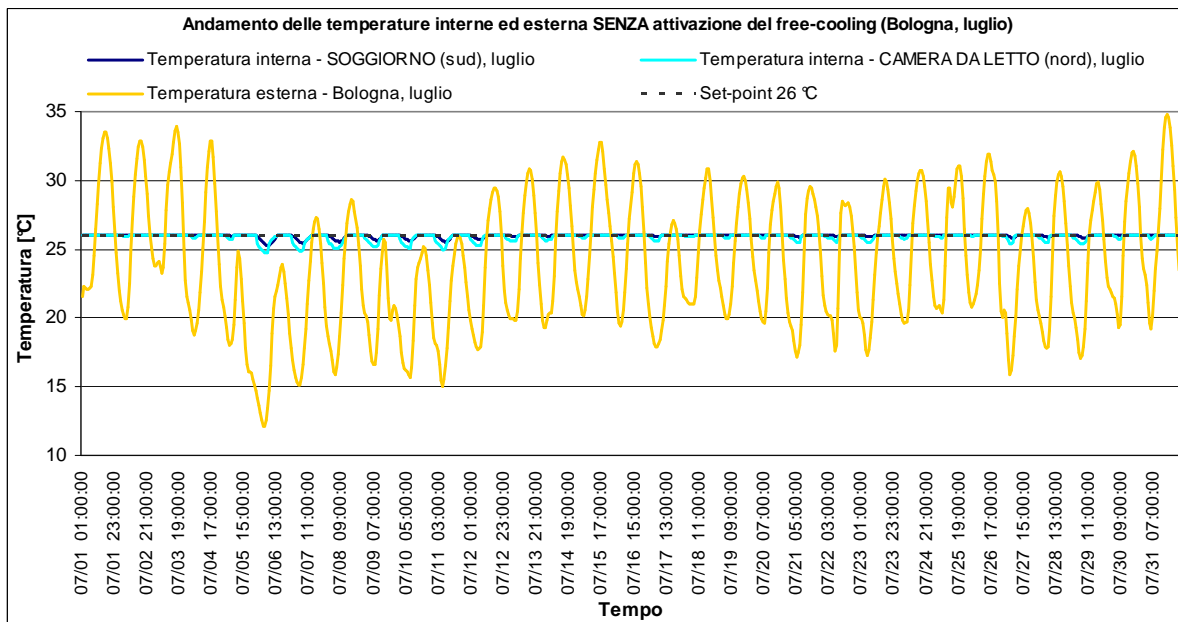


Figura 4.16 Profilo della temperatura dell'aria esterna (Bologna, luglio) e della temperatura dell'aria interna per due ambienti della casa passiva. Situazione senza attivazione del *free cooling*.

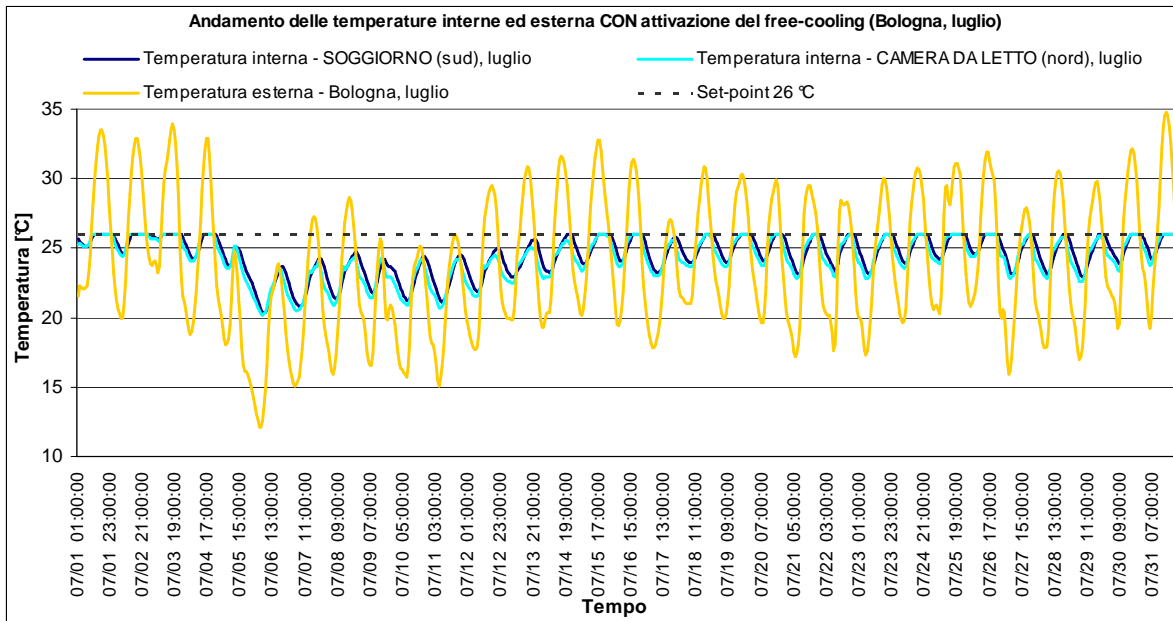


Figura 4.17 Profilo della temperatura dell'aria esterna (Bologna, luglio) e della temperatura dell'aria interna per due ambienti della casa passiva. Situazione con attivazione del *free cooling*.

In riferimento alla temperatura dell'aria, i grafici in Figura 4.16 e Figura 4.17, riferiti rispettivamente alla condizione senza l'attivazione della ventilazione naturale e a quella con l'attivazione della stessa, riportano il confronto tra il profilo della temperatura dell'aria interna nel mese di luglio per due ambienti dell'edificio (soggiorno a sud e camera da letto a nord) e l'andamento della temperatura dell'aria esterna; si può osservare nei due casi come la temperatura interna passi da una condizione in cui il suo profilo coincide quasi costantemente con la temperatura di regolazione per il raffrescamento (26 °C) ad una situazione (con il *free cooling*) in cui il profilo si colloca ampiamente al di sotto del set-point di attivazione.

La stessa analisi, considerando l'attivazione della ventilazione naturale, è condotta per la casa passiva sita idealmente a Palermo. Il confronto dei risultati tra la condizione precedente e l'attivazione del *free cooling* è riportato in Figura 4.18, in cui si può osservare come anche in questo caso, come per Bologna, l'aumento del tasso di ventilazione nelle ore in cui la temperatura dell'aria esterna è inferiore alla temperatura dell'aria interna ha condotto ad un miglioramento della prestazione termica estiva dell'edificio passivo. Tuttavia, l'effetto è meno accentuato a causa dei valori orari che assume la temperatura esterna a Palermo, mediamente più alti che a Bologna e caratterizzati da una ridotta variabilità nel tempo (escursione termica limitata). Tuttavia, il fabbisogno energetico si riduce di circa il 29% e le relative ore di attivazione dell'impianto del 36%, per effetto dell'aumento del flusso termico convettivo legato alla ventilazione (561%) che realizza, inoltre, tra tutti i termini del bilancio termico convettivo dell'aria interna, il maggiore scarto quadratico medio, secondo quanto riportato nel grafico in Figura 4.19.

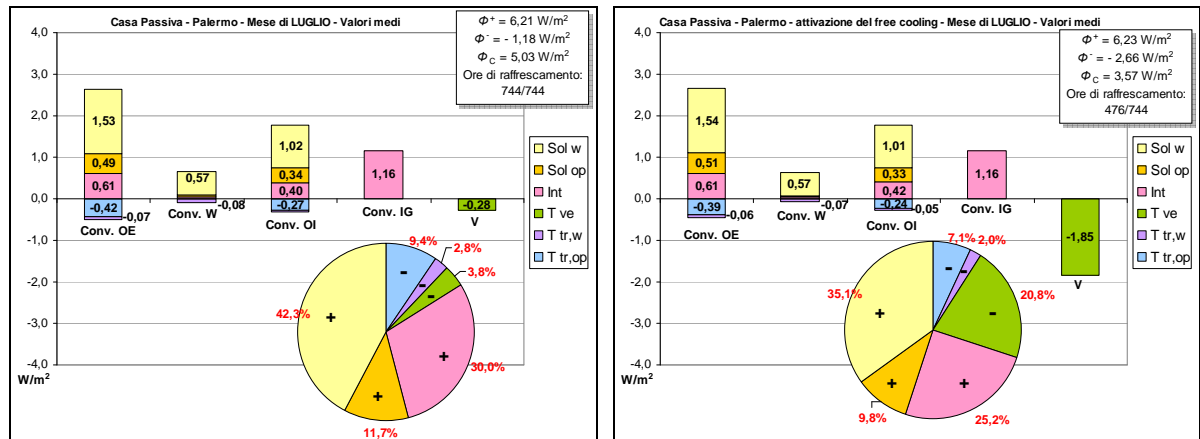


Figura 4.18 Confronto dei valori medi dei termini del bilancio termico e del contributo percentuale di ciascuna sollecitazione sul fabbisogno di energia (luglio) della casa passiva a Palermo tra la situazione originaria e la condizione di attivazione del *free cooling*.

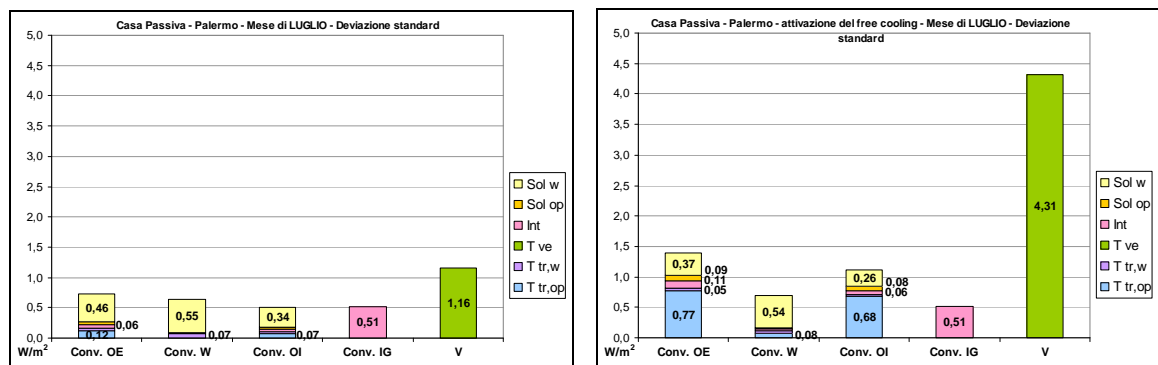


Figura 4.19 Confronto dello scarto quadratico medio dei termini del bilancio termico in relazione alle sollecitazioni dinamiche della casa passiva a Palermo tra la situazione originaria e la condizione di attivazione del *free cooling*.

In Figura 4.20 e in Figura 4.21 si riporta il profilo delle temperature in riferimento alla casa passiva a Palermo, rispettivamente nella condizione originaria e in seguito all'attivazione del *free cooling*. Si può osservare come nel primo caso la temperatura dell'aria interna per due locali dell'abitazione (soggiorno a sud e camera da letto a nord) sia pressoché coincidente con la temperatura di regolazione per il raffrescamento (26°C), che è in linea con quanto riportato in Figura 4.18 in riferimento alle ore di raffrescamento (744, pari al totale delle ore del mese di luglio).

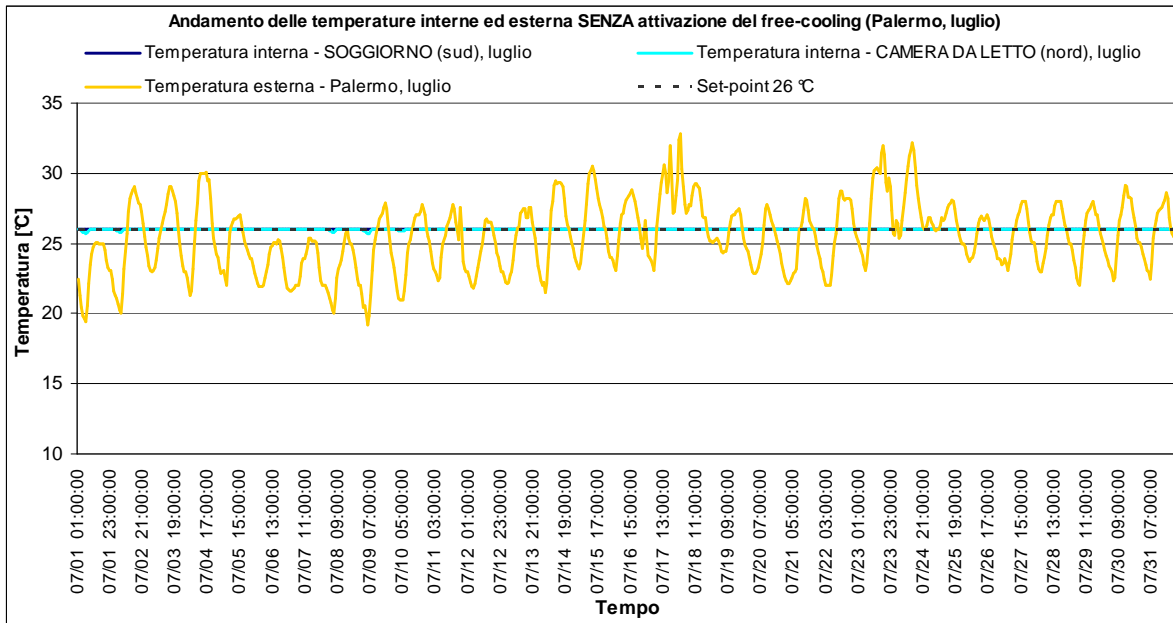


Figura 4.20 Profilo della temperatura dell'aria esterna (Palermo, luglio) e della temperatura dell'aria interna per due ambienti della casa passiva. Situazione senza attivazione del *free cooling*.

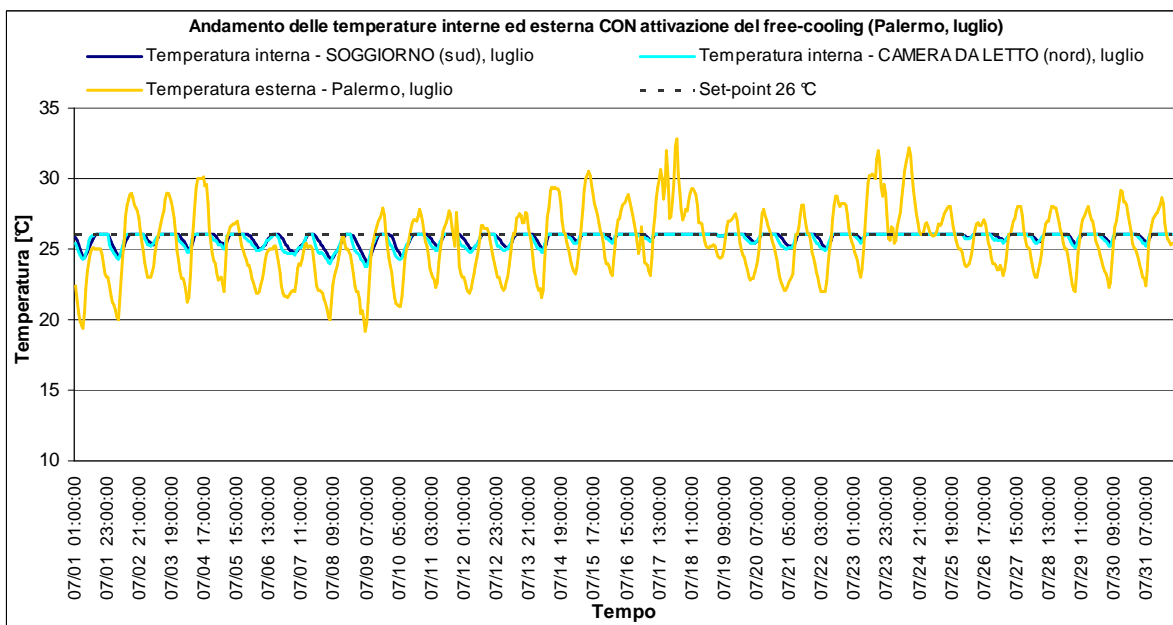


Figura 4.21 Profilo della temperatura dell'aria esterna (Palermo, luglio) e della temperatura dell'aria interna per due ambienti della casa passiva. Situazione con attivazione del *free cooling*.

A seguito dell'introduzione di una quantità più elevata di aria esterna, soprattutto nelle ore notturne, la temperatura dell'aria interna va al di sotto del set-point di attivazione dell'impianto, ma solamente per brevi periodi di tempo e raggiunge una temperatura che non è mai inferiore ai 23-24 °C. Da queste osservazioni e dei grafici delle figure precedenti si può concludere che l'attivazione della ventilazione naturale in modalità *free cooling* non è efficace a Palermo come a Bologna; pur risultando un'ottima strategia per la riduzione dei carichi interni, è sempre necessario l'ausilio di

sistemi attivi per il raffrescamento dell'edificio, per esempio prevedendo l'applicazione di una pompa di calore reversibile a bassa potenza. Questo esito trova riscontro con quanto descritto al par. 1.2.5 in riferimento ai risultati delle analisi condotte per alcune località italiane all'interno del progetto "Passive-on".

In Figura 4.22 è riportata, per le due località considerate, la relazione intercorrente tra la differenza del carico frigorifero medio mensile (luglio) nella condizione senza *free cooling* e nella condizione con l'attivazione del *free cooling* e la differenza cumulata positiva tra il set-point di attivazione dell'impianto (26 °C) e la temperatura esterna riferita a tutte le ore di luglio (744). Si individua, a parità di condizioni al contorno (es. portata di aria esterna), una linea di tendenza.

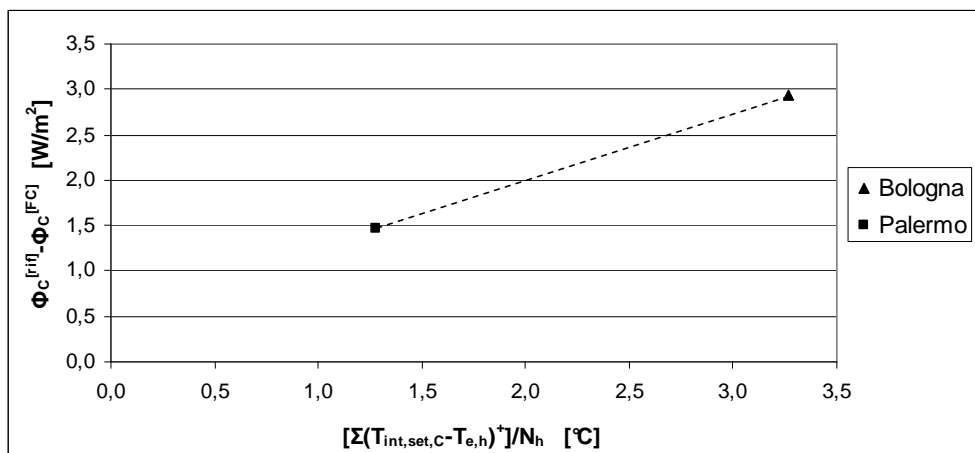


Figura 4.22 Relazione tra la differenza del carico frigorifero medio mensile, in assenza ("rif") e in presenza ("FC") del *free cooling*, e la differenza cumulata positiva tra il set-point di attivazione dell'impianto (26 °C) e la temperatura esterna riferita alle ore di luglio (N_h), per le due località analizzate (Bologna e Palermo).

È possibile concludere che l'effetto del *free cooling* è fortemente legato alla località considerata e alla specificità del clima, per cui affinché in una casa passiva la ventilazione notturna sia efficace occorre, generalmente, che vi sia una sufficiente differenza di temperatura tra l'aria interna (set-point) e l'aria esterna con valori di temperatura dell'aria esterna inferiori a quelli dell'aria interna; qualora sussista questa condizione, occorre progettare correttamente il sistema di ventilazione prevedendo adeguate portate d'aria esterna e condizioni di immissione che non causino situazioni di discomfort locale per effetto della velocità dell'aria.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di ricerca, sviluppata intorno al tema dell'analisi energetica degli edifici, ha avuto come obiettivo principale l'elaborazione di una nuova metodologia di analisi termica utile ad indagare i parametri che maggiormente influenzano la prestazione energetica. Il metodo consiste nell'analizzare in dettaglio i differenti contributi al bilancio termico convettivo dell'aria interna e le loro interrelazioni in riferimento alle differenti condizioni al contorno; ciascun contributo è incorporato in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche relative all'ambiente esterno ed interno, ovvero la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare, le sorgenti termiche interne. In questo modo i termini del bilancio energetico sono rappresentati dalla ventilazione, dal flusso termico convettivo delle sorgenti termiche interne e dai flussi termici convettivi scambiati tra le superfici interne e l'aria ambiente per effetto di differenti contributi: differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno; radiazione solare incidente sull'involucro edilizio opaco e trasparente; radiazione emessa delle sorgenti termiche interne. Ciascuno di questi contributi può essere riferito separatamente a specifici gruppi di componenti che scambiano energia termica con l'aria interna, ossia l'involucro opaco, l'involucro trasparente, i componenti edilizi interni, etc. La metodologia distingue inoltre tra il valore medio e la deviazione standard di ciascun termine del bilancio termico convettivo.

Al fine di individuare all'interno di ciascun termine del bilancio termico la quota da attribuire a ciascuna sollecitazione, si applica il principio di sovrapposizione degli effetti realizzando su uno stesso modello una serie di simulazioni con il codice di simulazione numerica dettagliata *EnergyPlus*, aggiungendo di volta in volta una sollecitazione diversa. All'elaborazione della metodologia di indagine fa seguito l'individuazione di una specifica modalità di rappresentazione dei risultati, attraverso la quale è possibile evidenziare e confrontare i pesi delle diverse sollecitazioni/termini del bilancio termico sul fabbisogno di energia e sui carichi frigoriferi dell'edificio: due grafici particolari illustrano, rispettivamente, i valori medi mensili dei contributi al bilancio termico convettivo dell'aria ambiente e lo scarto quadratico medio degli stessi termini all'interno di un mese specifico.

Una particolarità del metodo consiste nel fatto che i parametri che influenzano la prestazione energetica di un edificio possono essere individuati direttamente nella rappresentazione, oppure, al fine di raggiungere un dettaglio maggiore, attraverso l'accorpamento di alcuni contributi al bilancio termico. In questo modo è possibile indagare, ad esempio, quale sia l'influenza dell'involucro edilizio sulla prestazione termica dell'edificio, oppure se sia prevalente l'influenza dell'involucro opaco o di quello trasparente. Questo aspetto rappresenta il potenziale della metodologia d'indagine nell'individuare il peso dell'involucro nel suo complesso, e nello specifico, quello dell'involucro opaco sulla prestazione termica estiva degli edifici, per studiare l'effetto del livello di isolamento termico in vista di una sua ottimizzazione progettuale. La metodologia d'indagine può essere utilizzata anche per la progettazione termica e la diagnosi energetica degli edifici e permette, tra

l'altro, di effettuare un confronto accurato tra metodi di calcolo della prestazione energetica.

L'applicazione principale della metodologia d'indagine ha riguardato l'analisi parametrica di due casi studio, un edificio residenziale e un edificio ad uso uffici; di essi è fissata la località (Roma), l'uso e la geometria. In particolare, i dati relativi all'uso e alla gestione dell'edificio (es. utilizzo delle schermature solari) sono ricavati, sia direttamente sia mediante rielaborazione, dalla normativa tecnica (UNI EN ISO 13790, UNI/TS 11300-1, UNI EN 15251) e dalla letteratura tecnico-scientifica. Gli altri parametri che determinano la prestazione energetica estiva degli edifici sono fatti variare; tra essi si annoverano l'estensione della superficie trasparente e le sue proprietà termiche e solari, i livelli di isolamento e di inerzia termica dell'involucro opaco, le proprietà solari della superficie opaca esterna.

Attraverso la tecnica di campionamento *Latin Hypercube* sono state ottenute, per ciascun caso studio, 60 differenti combinazioni delle variabili parametriche che rappresentano un campione significativo. L'analisi energetica del campione, attraverso l'applicazione della metodologia di analisi termica, ha condotto all'individuazione dell'elevato contributo dell'involucro edilizio al carico termico medio mensile (luglio) dell'edificio ad uso residenziale, e del ridotto contributo dello stesso sulla prestazione energetica estiva dell'edificio ad uso uffici.

Per individuare il contributo dell'involucro opaco e soprattutto quello dell'isolamento termico è stata effettuata un'analisi di sensibilità utile a ricavare il peso di ciascun parametro (variabile indipendente) sulla prestazione termica estiva dell'edificio (variabile dipendente), espressa sia dal fabbisogno netto di energia per il raffrescamento sia dalla potenza frigorifera massima nel mese di luglio. L'accorpamento dei parametri originari campionati in parametri "semi-empirici" ha reso possibile l'individuazione, tra i modelli matematici studiati, di una funzione di tipo esponenziale per relazionare le variabili indipendenti alla variabile dipendente. Attraverso l'effettuazione di una regressione lineare multipla della variabile dipendente trasformata secondo l'equazione proposta e l'individuazione del valore dei coefficienti di regressione standardizzati, è stato ricavato il contributo di ciascun parametro, e in particolare quello dell'isolamento termico, sulla prestazione termica estiva per i due casi studio esaminati.

In riferimento al microclima esterno e alle condizioni d'uso considerate, i risultati dell'analisi di sensibilità mostrano la ridotta influenza dell'involucro edilizio opaco sulla prestazione termica estiva a causa della prevalente influenza di altri fattori, quali le caratteristiche termiche e solari della superficie trasparente e l'estensione della superficie stessa. Nell'edificio ad uso uffici, in particolare, il contributo maggiore al carico interno non è da attribuire all'involucro, ma alle sorgenti termiche interne.

L'importanza dell'isolamento termico nella progettazione termica estiva aumenta al diminuire dell'estensione della superficie vetrata e dell'effetto delle schermature solari; aumenta inoltre al diminuire degli apporti termici interni. L'ottimizzazione del livello di isolamento termico, nonché

quello delle dimensioni della superficie vetrata e delle sue caratteristiche termo-energetiche, è necessariamente legato al comportamento dell'edificio su tutto l'anno e al corretto bilancio tra opposte esigenze (invernali, estive).

L'iper-isolamento delle strutture di involucro, tuttavia, è determinante nella progettazione di edifici passivi, al fine di conseguire ridotti o quasi nulli consumi energetici nella stagione invernale; stabilita questa necessità e dimostrato l'effetto limitato dell'isolamento termico nella stagione estiva sul fabbisogno, occorre mettere in atto specifiche strategie di riduzione dei carichi frigoriferi per annullare l'effetto negativo di elevati apporti termici interni e di superfici vetrate mediamente estese, indispensabili per lo sfruttamento sia dell'illuminazione naturale sia degli apporti solari in inverno.

L'ottimizzazione progettuale è un'altra possibile applicazione della nuova metodologia d'indagine termica; un esempio è fornito attraverso l'analisi di un edificio passivo in costruzione a Carpi (MO), caratterizzato dall'iper-isolamento delle strutture d'involucro. La prestazione energetica estiva dell'edificio è ricavata sia nella condizione reale dell'edificio sia ipotizzando un diverso utilizzo e una diversa località. Le "criticità" progettuali evidenziate attraverso l'applicazione del metodo riguardano la presenza di carichi interni di modesta entità e l'utilizzo delle schermature solari poste nell'intercapedine del serramento, che, se non ventilata, determinano un aumento della temperatura sulla superficie interna della vetrata e un conseguente aumento del flusso termico convettivo dalla superficie stessa all'aria ambiente. È stata quindi proposta una strategia per l'abbattimento dei carichi interni: si tratta dell'attivazione della ventilazione naturale, introducendo in ambiente una portata d'aria più elevata quando le condizioni esterne risultano favorevoli. La riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento è conseguente all'aumento del flusso termico convettivo legato alla ventilazione, come ben evidenziato nella rappresentazione grafica della metodologia d'analisi. Occorre però considerare che l'efficacia della ventilazione notturna è fortemente legata alla specificità del clima; affinché in una casa passiva il *free cooling* sia efficace è, generalmente, necessaria una condizione di temperatura dell'aria esterna inferiore alla temperatura dell'aria interna prevedendo comunque un corretto dimensionamento della portata d'aria. Si è dimostrato infatti come l'utilizzo del *free cooling* sia più efficace in climi come quello di Bologna, piuttosto che di Palermo, caratterizzato, quest'ultimo, da una ridotta escursione termica della temperatura dell'aria esterna nell'arco delle ventiquattro ore.

Un'ulteriore applicazione della nuova modalità di analisi termica è stata presentata per sviluppare il confronto tra modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici: il metodo di calcolo semplificato in regime quasi-stazionario e il metodo di calcolo dettagliato in regime dinamico. Il confronto è stato effettuato applicando la procedura di calcolo UNI/TS 11300-1 e il codice di simulazione numerica *EnergyPlus* ad un caso studio. Al fine di individuare le cause degli scostamenti tra i risultati dei due modelli, sono stati raffrontati i termini dell'equazione di bilancio energetico ricavati attraverso l'applicazione della UNI/TS 11300-1 con quelli ricavati con

EnergyPlus mediante lo scorporo dei termini del bilancio termico convettivo in funzione delle sollecitazioni termiche dinamiche; ogni contributo al bilancio termico è stato poi attribuito ad ogni singolo elemento d'involucro o gruppi di componenti edilizi caratterizzati dalla medesima adiacenza (esterno, terreno, ambienti non climatizzati). La metodologia d'indagine ha permesso di individuare le cause del divario tra i due modelli di calcolo in alcuni termini del bilancio; esso è da ascriversi principalmente alla diversa caratterizzazione dei flussi termici, puramente convettivi nel metodo semplificato e di natura mista nel metodo dettagliato, in cui la quota convettiva che bilancia le condizioni dell'aria interna – a meno della ventilazione e della quota convettiva delle sorgenti interne – è il risultato finale di scambi termici di natura radiativa tra le sorgenti di calore interne e le superfici interne, e tra le superfici stesse. Questo è uno degli aspetti principali che rende il metodo dettagliato, rispetto al metodo semplificato, uno strumento che meglio riflette il reale comportamento termico dell'edificio.

Alla luce di queste considerazioni, e in riferimento allo studio dell'effetto dell'isolamento termico sulla prestazione termica estiva degli edifici, occorre sottolineare che il lavoro di tesi ha portato alla messa a punto di una metodologia di analisi piuttosto che a risultati generalizzabili. Tra gli sviluppi futuri dell'attività di ricerca, poiché i risultati conseguiti sono applicabili solo ad edifici in cui il profilo d'uso, la geometria e la localizzazione sono assimilabili a quelli degli edifici analizzati, è prevista l'estensione dello studio al fine di considerare un numero più ampio di condizioni al contorno.

Inoltre, l'analisi di sensibilità, pur identificando in maniera qualitativa ma già sufficientemente indicativa il peso di ciascun parametro progettuale o condizione al contorno sulla prestazione termica estiva, dovrà essere approfondita al fine di individuare un'espressione più corretta per predire l'entità del fabbisogno in funzione dei parametri di influenza.

La particolare applicazione della metodologia di analisi termica degli edifici nel confronto tra modelli di calcolo della prestazione energetica, ovvero metodo di calcolo quasi-stazionario (UNI/TS 11300) e metodo di calcolo dettagliato in regime dinamico (*EnergyPlus*), ha evidenziato la necessità di proseguire nello studio volto alla validazione dei metodi di calcolo semplificati in regime quasi-stazionario, soprattutto per ciò che concerne la determinazione del fabbisogno di energia per il raffrescamento e in riferimento allo scambio termico per trasmissione, che, tra tutti i termini del bilancio energetico, è quello che causa lo scostamento maggiore tra i due modelli di calcolo.

Bibliografia

Articoli su rivista e memorie in convegni

L'isolamento termico e la prestazione energetica estiva degli edifici

- M.S. Al-Homoud, *Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*, in “Building and Environment”, n. 40-2005, pp. 351-364.
- M.J. Al-Khawaja, *Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation*, in “Applied Thermal Engineering”, n. 24-2004, pp. 2601-2610.
- S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, *Optimum insulation thickness for building walls in a hot-dry climate*, in “International Journal of Ambient Energy”, vol. 23 n. 3-2002, pp. 115-126.
- A. Al-Turki, G.M. Zaki, *Cooling load response for building walls comprising heat storing and thermal insulating layers*, in “Energy Conversion and Management”, vol. 32 n. 3-1991, pp. 235-247.
- G. C. Bakos, *Insulation protection studies for energy saving in residential and tertiary sector*, in “Energy and Buildings”, n. 31-2000, pp. 251-259.
- I. Ballarini, V. Corrado, *L'isolamento termico dell'involucro edilizio per il miglioramento della prestazione termica estiva degli edifici*, in Memorie del 64° Congresso ATI, L'Aquila 2009.
- I. Ballarini, V. Corrado, *L'effetto dell'isolamento termico nell'ottimizzazione della prestazione termica estiva di un edificio passivo*, in Memorie del 65° Congresso ATI, Cagliari 2010.
- A. Bolattürk, *Optimum insulation thickness for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey*, in “Building and Environment”, n. 43-2008, pp. 1055-1064.
- C. Filippin, A. Beascochea, *Performance assessment of low-energy buildings in central Argentina*, in “Energy and Buildings”, n. 39-2007, 546-557.
- C. Filippin, S. Flores Larsen, E. Lopez Gay, *Energy improvement of a conventional dwelling in Argentina through thermal simulation*, in “Renewable Energy”, n. 33-2008, pp. 2246-2257.
- C. Ghiaus, F. Allard, *Potential for free-cooling by ventilation*, in “Solar Energy”, n. 80-2006, pp. 402-413.
- A. Giovanardi, A. Troi, W. Sparber, P. Baggio, *Dynamic simulation of a passive house in different locations in Italy*, in Proceeding of “The 25th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA)”, Dublin 2008.

-
- P. Hoes, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, B. de Vries, D. Bourgeois, *User behaviour in whole building simulation*, in “Energy and Buildings”, n. 41-2009, pp. 295-302.
 - F. Karlsson, B. Moshfegh, *Energy demand and indoor climate in a low energy building – changed control strategies and boundary conditions*, in “Energy and Buildings”, n. 38-2006, pp. 315-326.
 - B. Keller, E. Magyari, *A universally valid strategy for low energy houses*, in “Renewable Energy”, n. 15-1998, pp. 401-406.
 - E. Kossecka, J. Kosny, *Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building*, in “Energy and Buildings”, n. 34-2002, pp. 321-331.
 - M. Macias, J. A. Gaona, J. M. Luxan, G. Gomez, *Low cost passive cooling systems for social housing in dry hot climate*, in “Energy and Buildings”, n. 41-2009, pp. 915-921.
 - G.K. Oral, A.K. Yener, N.T. Bayazit, *Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions*, in “Building and Environment”, n. 39-2004, pp. 281-287.
 - M. Ozel, K. Pihtili, *Optimum insulation and distribution of insulation layers on building walls with various orientations*, in “Building and Environment”, n. 42-2007, pp. 3051-3059.
 - A.M. Papadopoulos, E. Giama, *Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building*, in “Building and Environment”, n. 42-2007, pp. 2178-2187.
 - D. S. Parker, *Very low energy homes in the United States: perspectives of performance from measured data*, in “Energy and Buildings”, n. 41-2009, pp. 512-520.
 - M.L. Persson, A. Roos, M. Wall, *Influence of window size on the energy balance of low energy houses*, in “Energy and Buildings”, n. 38-2006, pp. 181-188.
 - J. Ü. Pfafferott, S. Herkel, J. Wapler, *Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models*, in “Energy and Buildings”, n. 37-2005, pp. 844-852.
 - J. Ü. Pfafferott, S. Herkel, D. E. Kalz, A. Zeuschner, *Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria*, in “Energy and Buildings”, n. 39-2007, pp. 750-757.
 - R.M. Pulselli, E. Simoncini, N. Marchettini, *Energy and emergy based cost-benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate*, in “Building and Environment”, n. 44-2009, pp. 920-928.
 - A. Stegou-Sagia, K. Antonopoulos, C. Angelopoulou, G. Kotsiovelos, *The impact of glazing on energy consumption and comfort*, in “Energy Conversion and Management”, n. 48-2007, pp.

2844-2852.

- J. Straube, *The Building Enclosure*, Building Science Digest 018, Building Science Press, 2006.

Metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici

- I. Ballarini, V. Corrado, *Application of energy rating methods to the existing building stock: analysis of some residential buildings in Turin*, in "Energy and Buildings", n. 41-2009, pp. 790-800.
- I. Ballarini, A. Capozzoli, V. Corrado, *Validazione del metodo semplificato (UNI/TS 11300) mediante applicazione dell'analisi numerica in regime dinamico*, in Atti del Convegno AICARR "Prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto: software per la diagnosi energetica ed il calcolo in regime invernale", Bologna 2009, pp. 175-186.
- I. Ballarini, A. Capozzoli, V. Corrado, *A validation of the quasi-steady state building energy model by a dynamic numerical analysis*, in Proceedings of the 10th Rehva World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings" Clima 2010, Antalya 2010.
- V. Corrado, E. Fabrizio, *Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model: Simplified correlation for gain-loss mismatch*, in "Energy and Buildings" n. 39-2007, pp. 569-579.
- V. Corrado, I. Ballarini, *La nuova normativa tecnica nazionale ed europea quale risposta ai requisiti di accuratezza, semplicità, riproducibilità e trasparenza nelle procedure di certificazione energetica* (relazione ad invito), in Atti del Convegno AICARR "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna 2008, pp. 21-37.
- E. Fabrizio, *Strumenti per la stima dei consumi*, in "CDA", n. 2-2009, pp. 14-21.
- A. Prada, M. Baratieri, P. Baggio, P. Romagnoni, A. Gasparella, *Caratteristiche dinamiche dei componenti edilizi: metodi semplificati (UNI EN ISO 13786), modellazione dettagliata e dati sperimentali*, in Atti del Convegno AICARR "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna 2008, pp. 371-382.

Prestazioni e utilizzo delle schermature solari

- V. Inkarojrit, *Developing predictive venetian blinds control models using visual comfort predictors*, Proceedings of "The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA)", Geneva (Switzerland) 2006.
- T. Inoue, T. Kawase, T. Ibamoto, S. Takakusa, Y. Matsuo, *The development of an optimal control system for window shading devices based on investigations in office buildings*, in

“ASHRAE Transactions”, n. 94 part 2, 1988, pp. 1034-1049.

- R. Leslie, R. Raghavan, O. Howlett, C. Eaton, *The potential of simplified concepts for daylight harvesting*, in “Lighting Research and Technology”, n. 37-2005, pp. 21-38.
- G.R. Newsham, *Manual control of window blinds and electric lighting: implications for comfort and energy consumption*, in “Indoor and Built Environment”, n. 3-1994, pp. 135-144.
- C.F. Reinhart, *Effects of interior design on the daylighting availability in open plan offices*, Proceedings of the “ACEEE Summer Study on Energy Efficient Buildings”, Pacific Grove (CA., U.S.A.) 2002, pp. 1-12.
- C.F. Reinhart, M. Morrison, F. Dubrous, *The Lightswitch Wizard – reliable daylight simulations for initial design investigation*, Proceedings of the “Building Simulation 2003”, Eindhoven (The Netherlands) 2003, vol. 3, pp. 1093-1100.
- C.F. Reinhart, *Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds*, in “Solar Energy”, n. 77-2004, pp. 15-28.

Analisi statistica

- A. Capozzoli, H.E. Mechri, V. Corrado, *Impact of architectural design choices on building energy performance. Application of uncertainty and sensitivity techniques*, in Proceedings of “11th International IBPSA Conference”, Glasgow 2009.
- H.E. Mechri, A. Capozzoli, V. Corrado, *USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design*, in “Applied Energy”, n. 87-2010, pp. 3073-3083.

Monografie

Progettazione passiva

- C. Benedetti, *Manuale di architettura bioclimatica*, Maggioli, Rimini 1994.
- S. Bruno, *Manuale di architettura per la progettazione bioclimatica e la bioedilizia*, Il Sole 24 ore, Milano 1999.
- S. Brunoro, *Efficienza energetica delle facciate*, Maggioli, Rimini 2006.
- A. Carotti, D. Madé, *La casa passiva in Italia. Teoria e Progetto di una “casa passiva” in tecnologia tradizionale*, Rockwool Italia s.p.a., Milano 2006.
- B. Ford, R. Schiano-Phan, D. Zhongcheng, *The Passivhaus Standard in European warm climates: Design guidelines for comfortable low energy homes. Part 1. A review of comfortable low energy homes*, “Passive-on Project”, 2007 [<http://www.passive-on.org/en/cd.php>].

- B. Ford, R. Schiano-Phan, D. Zhongcheng, *The Passivhaus Standard in European warm climates: Design guidelines for comfortable low energy homes. Part 3. Comfort, climate and passive strategies*, “Passive-on Project”, 2007 [<http://www.passive-on.org/en/cd.php>].
- L. Pagliano, S. Carlucci, T. Toppi, P. Zangheri, *Passivhaus per il sud dell’Europa. Linee guida per la progettazione*, Rockwool Italia s.p.a., Milano 2007.
- L. Pagliano, S. Carlucci, T. Toppi, P. Zangheri, *The Passivhaus Standard in European warm climates: Design guidelines for comfortable low energy homes. Part 2. National proposals in detail: Italy*, “Passive-on Project”, 2007 [<http://www.passive-on.org/en/cd.php>].
- Passive-on, “Passive-on Long Description”, 2007 [<http://www.passive-on.org/en/>].

Isolamento termico: materiali e tecnologie

- A. Fassi, L. Maina, *L’isolamento eco-efficiente: guida all’uso dei materiali naturali*, Edizioni Ambiente, Milano 2006.
- S. Mammi, A. Panzeri, *L’isolamento termico e acustico. Vol. 1: I materiali isolanti*, Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico (ANIT), TEP, Milano 2008.

L’isolamento termico e la prestazione energetica estiva degli edifici

- G. Galbusera, A. Panzeri, C. Salani, G. Tuoni, F. Leccese, A. Arengi, I. Scaramella, *L’isolamento termico e acustico. Vol. 5: Prestazioni estive degli edifici*, Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico (ANIT), TEP, Milano 2010.

Metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici

- ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, “Load and energy calculations” section. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta 2005.
- V. Corrado, I. Ballarini, *UNI/TS 11300. La nuova Normativa Nazionale per il calcolo della Prestazione Energetica degli edifici*, Rockwool, Milano 2009.
- *EnergyPlus*: Energy Simulation Software. Version 3.1. *EnergyPlus* Documentation. United States Department of Energy, 2009 [<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>].

Analisi statistica

- F. Pellerey, *Elementi di statistica per le applicazioni*, Celid, Torino 1998.
- SimLab 2.2, *Reference Manual*, 2009 [<http://simlab.jrc.ec.europa.eu/>].

Legislazione

- Direttiva 2002/91 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee n. L1 del 4 gennaio 2003.
- Direttiva 2010/31 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea n. L153 del 18 giugno 2010.
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 “Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia”, pubblicato sul Supplemento ordinario n. 158/L alla Gazzetta Ufficiale n. 222 del 23 settembre 2005.
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia”, pubblicato sul Supplemento ordinario n. 26 alla Gazzetta Ufficiale n. 26 del 1° febbraio 2007.
- D.P.R. 2 aprile 2009 n. 59 “Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia”, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 132 del 10 giugno 2009.
- Decreto Ministeriale 26 giugno 2009 “Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici”, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 158 del 10 luglio 2009.

Normativa tecnica

- UNI 10339. Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura. Giugno 1995.
- UNI 10349. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Aprile 1994.
- UNI 10351. Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore. Marzo 1994.
- UNI 10355. Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo. Maggio 1994.
- UNI/TS 11300-1. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Maggio 2008.
- UNI/TS 11300-2. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: Determinazione dell'energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda per usi igienico-sanitari. Maggio 2008.

- UNI/TS 11300-3. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. Marzo 2010.
- UNI EN 12831. Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto. Dicembre 2006.
- UNI EN 15243. Ventilazione degli edifici. Calcolo delle temperature nei locali, del carico termico e dell'energia per edifici dotati di impianto di climatizzazione degli ambienti. Maggio 2008.
- UNI EN 15251. Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica. Febbraio 2008.
- UNI EN 15316-1. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 1: Generalità. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-2-1. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 2-1: Sistemi di emissione del calore negli ambienti. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-2-3. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 2-3: Sistemi di distribuzione del calore negli ambienti. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-3-1. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 3-1: Impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, caratterizzazione dei fabbisogni (fabbisogni di erogazione). Maggio 2008.
- UNI EN 15316-3-2. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 3-2: Impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, distribuzione. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-3-3. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 3-3: Impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, generazione. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-4-1. Impianti di riscaldamento degli edifici. Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto. Parte 4-1: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, sistemi a combustione (caldaie), caldaie. Settembre 2008.
- UNI EN 15316-4-2. Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-2: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, pompe di calore. Ottobre 2008.

- UNI EN 15316-4-3. Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-3: Sistemi di generazione del calore, sistemi solari termici. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-4-4. Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-4: Sistemi di generazione del calore, sistemi di cogenerazione negli edifici. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-4-5. Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-5: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, prestazione e qualità delle reti di riscaldamento urbane e dei sistemi per ampie volumetrie. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-4-6. Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-6: Sistemi di generazione del calore, sistemi fotovoltaici. Maggio 2008.
- UNI EN 15316-4-7. Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-7: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, sistemi di combustione a biomassa. Marzo 2009.
- UNI EN ISO 6946. Componenti edilizi ed elementi per l'edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo. Luglio 2008.
- UNI EN ISO 10077-1. Prestazione termica di finestre, porte e chiusure. Calcolo della trasmittanza termica. Parte 1: Generalità. Marzo 2007.
- UNI EN ISO 13370. Prestazione termica degli edifici. Trasferimento di calore attraverso il terreno. Metodi di calcolo. Maggio 2008.
- UNI EN ISO 13786. Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo. Maggio 2008.
- UNI EN ISO 13789. Prestazione termica degli edifici. Coefficiente di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione. Metodo di calcolo. Maggio 2008.
- UNI EN ISO 13790. Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento. Giugno 2008.
- UNI EN ISO 14683. Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineare. Metodi semplificati e valori di riferimento. Maggio 2008.
- ISO 16813. Building environment design. Indoor environment. General principles. 2006.
- ISO 16818. Building environment design. Energy efficiency. Terminology. 2008.

Siti web

- <http://www.designbuilder.co.uk/content/view/43/64/>
- <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/>
- <http://www.spss.com/software/statistics/>
- <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm
- <http://www.passive-on.org/en/cd.php>

Nomenclatura

Elenco della simbologia richiamata nel testo.

Simbolo	Grandezza	Unità di misura
A	area	$[m^2]$
b	fattore di correzione dello scambio termico	$[-]$
C	capacità termica	$[J/K]$
c	calore specifico	$[J/(kg\ K)]$
F, f	fattore, frazione	$[-]$
g	trasmittanza di energia solare totale	$[-]$
H	coefficiente di scambio termico	$[W/K]$
h	coefficiente di scambio termico liminare	$[W/(m^2\ K)]$
I	irradianza	$[W/m^2]$
m_s	massa frontale	$[kg/m^2]$
\dot{m}	portata in massa	$[kg/s]$
Q	energia termica	$[J]$, $[Wh]$
q	portata volumica	$[m^3/s]$
s	spessore	$[m]$
T	temperatura	$[^\circ C]$, $[K]$
t, τ	tempo	$[s]$, $[h]$
U	trasmittanza termica	$[W/(m^2\ K)]$
V	volume	$[m^3]$
W	energia elettrica	$[J]$, $[Wh]$
Y	trasmittanza termica periodica	$[W/(m^2\ K)]$
α	coefficiente di assorbimento	$[-]$
η	fattore di utilizzazione, rendimento	$[-]$
κ	capacità termica areica	$[J/(m^2\ K)]$
λ	conduttività termica	$[W/(m\ K)]$
ρ	massa volumica	$[kg/m^3]$
τ	coefficiente di trasmissione	$[-]$
Φ	flusso termico	$[W]$
Pedici		
A	apparecchiature	
adj	corretto	
ae	aria esterna	
ai	aria interna	
aux	ausiliario di sistema	
B	edificio (componenti edilizi)	
C	raffrescamento	
c, conv	convettivo, convezione	
Cr	effettivo per raffrescamento	
d	distribuzione (sottosistema)	
dif	diffusa (irradianza solare)	
dir	diretta (irradianza solare)	
E, el	energia elettrica	
e	esterno, estivo, emissione (sottosistema)	
env	involucro	
F	telaio	
f	pavimento	
g	lordo	

gl	vetro
gn	apporti, generazione (sottosistema)
H	riscaldamento
HW	acqua calda sanitaria
h	orario
ht	scambio termico
IG	apporti interni
i	interno, invernale
ie	interno-esterno
ins	isolamento
int	interno
invol	involucro
l, ls	dispersione termica, perdita di energia termica
lrh	perdite di energia termica recuperate
m, mn	medio
mm	medio mensile
ms	strato massivo
n	netto, incidenza normale
nd	fabbisogno netto
OC	occupazione
OE	opaco esterno (componente)
OI	opaco interno (componente)
oi	interno totale (dimensione)
op	opaco
P	persona
p	primaria (energia)
r	radiazione infrarossa
rg	regolazione (sottosistema)
rr	recuperato
s	accumulo (sottosistema)
set	regolazione
sh	ombreggiatura
si	superficiale interno
sol	solare
syst	impianto
tot	totale
tr	trasmissione termica
u	non climatizzato
V, ve	ventilazione
W, w	trasparente (componente), serramento

Ringraziamenti

Al termine della tesi di dottorato ringrazio tutte le persone che hanno collaborato allo sviluppo della mia attività di ricerca.

Desidero innanzitutto ringraziare il prof. Vincenzo Corrado per il contributo che mi fornisce costantemente per la mia crescita professionale.

Un ringraziamento particolare è rivolto a Mauro Tricotti e Caterina Rocca della *Rockwool Italia s.p.a.* per la collaborazione circa l'inquadramento del tema di ricerca e del suo sviluppo.

Ringrazio Massimo Smerieri di *ET-Studio* ("Casa Autonoma") per le informazioni e il materiale progettuale forniti sulla casa passiva di Carpi.

Un sentito grazie anche al prof. Franco Pellerey del DIMAT per la consulenza in tema di analisi statistica.

Inoltre, vorrei esprimere la mia sincera gratitudine ai miei colleghi, in particolare ad Alfonso, Alice e Cristina per i loro validi consigli, e alla mia famiglia e a Renato per il continuo sostegno.

Ilaria Ballarini

